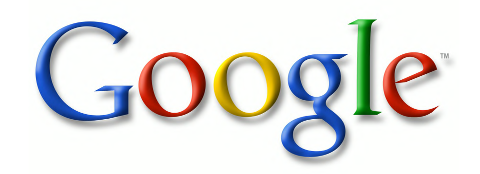
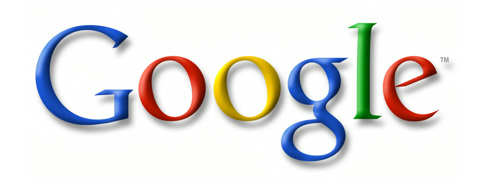






LA PHYSIQUE

EN ACTION.

PARIS. — TYPOGRAPHIE DE FIRMIN DIDOT FRÈRES, 56, RUE JACOB.

LA PHYSIQUE

EN ACTION,

OU

APPLICATIONS

UTILES ET INTÉRESSANTES DE CETTE SCIENCE;

PAR M. DESDOUITS.

OUVRAGE ORNÉ DE 262 FIGURES.

Tome premier.

PARIS,

JACQUES LECOFFRE ET CIE, LIBRAIRES,

RUE DU VIEUX COLOMBIER, 29,

CI-DEVANT RUE DU POT DE FER SAINT-SULPICE, 8.

1846.

AVERTISSEMENT.

J'ai voulu signaler dans cet ouvrage quelques applications d'une science dont on n'étudie le plus souvent, comme de presque toutes les autres, que la théorie.

Présenter une science par son côté utile et pratique, c'est en faire comprendre le but, c'est en encourager l'étude. Telle est la fin que je me suis proposée.

Cette fin ne serait pas remplie par un livre de *Physique amusante.* Ce ne sont pas de simples récréations scientifiques que j'ai voulu faire, mais un ouvrage véritablement instructif, qui fût propre à inspirer le goût d'une instruction plus complète. Et pour être d'un ordre plus élevé que celui qui s'attache à de simples jeux, l'intérêt de ces leçons n'en sera pas moins vif, et leur étude moins attrayante.

Ce livre diffère donc essentiellement, par son but, des traités de récréations physiques

que l'on trouve partout. Toutefois, il lui arrivera souvent de se rencontrer avec eux sur le même terrain. Parmi les applications utiles et sérieuses de la physique, beaucoup offrent ces conditions d'agrément qui leur assignent une place dans des livres destinés à récréer plutôt qu'à instruire. Cette combinaison fréquente de l'utile avec l'agréable est une bonne fortune dont nous devons nous féliciter.

N'ayant ici en vue que les applications, nous avons supprimé la théorie, nous bornant à rappeler les principes qu'il s'agit d'appliquer dans chaque cas. Les lecteurs désireux de connaître la théorie rationnelle ou expérimentale sur laquelle ces principes reposent, la trouveront dans tous les *Traités ordinaires de physique*, auxquels nous nous estimerons heureux de les voir recourir.

APPLICATIONS

UTILES ET INTÉRESSANTES

DE LA PHYSIQUE.

CHAPITRE PREMIER.

PROPRIÉTÉS GÉNÉRALES DES CORPS. — ÉTENDUE. — DIVISIBILITÉ. POROSITÉ. — COMPRESSIBILITÉ. — ÉLASTICITÉ.

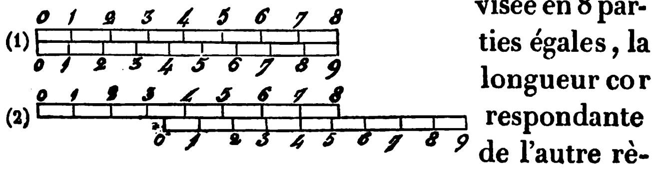
1. L'*étendue*, qui se présente à nous comme l'attribut fondamental et caractéristique de la matière, semble être du ressort de la pure géométrie. Toutefois, cette dernière science emprunte à la physique et à la mécanique des moyens d'appréciation, lorsque l'étendue à mesurer se trouve au-dessous de certaines limites de petitesse.

Ainsi les procédés ordinaires de mesure font défaut, lorsqu'il s'agit de déterminer, par exemple, l'épaisseur d'un cheveu, d'un fil d'araignée, d'une aile de mouche, d'une feuille d'or, d'une couche de vapeur. Les dimensions des animalcules infusoires, des globules du sang, et d'une foule d'êtres atomiques appartenant aux trois règnes, échappent évidemment aux moyens communs, et leur déter- **Mesure de l'étendue.**

mination n'offre pas moins d'intérêt que la mesure des corps relativement gigantesques que nous manions tous les jours.

Parmi les moyens d'appréciation destinés à saisir ces petitesses qui échappent à nos mains, et souvent même à nos sens, il en est quatre que nous citerons; savoir : le vernier, les vis micrométriques, la balance et le microscope.

Vernier. Le *vernier*. On donne ce nom à un appareil composé de deux règles, sur lesquelles on prend deux longueurs égales qu'on divise en très-petites parties; mais de telle sorte que l'une des règles contienne une division de plus que l'autre. Si l'une des deux, que nous supposerons fixe, est divisée en 8 parties égales, la longueur correspondante de l'autre règle, que nous supposerons mobile, contiendra 9 divisions.



D'où il suit que les zéros se correspondant, la division 1 de la règle mobile avancera à gauche sur la division 1 de la règle fixe de $\frac{1}{9}$ des parties égales de celle-ci; la division 2 avancera sur sa correspondante de $\frac{2}{9}$, la division 3 de $\frac{3}{9}$...., la division 8 de $\frac{8}{9}$, enfin le numéro 9 de l'une correspondra au numéro 8 de l'autre, et avancera ainsi d'une division entière. Supposons, pour fixer les idées, que les divisions de la règle fixe soient des millimètres.

Cela posé, que la règle mobile prenne, par une

[redacted]

cause quelconque, la position qu'elle a dans la figure 2. On voit bien que son zéro avance sur celui de la règle fixe de trois divisions entières; mais, de plus, il a parcouru une fraction qu'il s'agit d'évaluer. Pour cela, on examine à la loupe quelle division de la règle mobile correspond exactement à une division de la règle fixe. Admettons que ce soit le numéro 4. Prenant ce numéro pour point de départ, on voit que la division 3 avance à droite sur la supérieure de $\frac{1}{8}$ de millimètre, la division 2 de $\frac{2}{8}$, la division 1 de $\frac{3}{8}$, enfin le zéro de $\frac{4}{8}$. Ainsi, la fraction qu'il s'agit d'apprécier sera composée d'un certain nombre de huitièmes de millimètres égal au chiffre de la division de la règle mobile correspondant exactement à une division de la règle fixe. On comprend aisément que la même manœuvre pourrait s'appliquer à des lignes courbes, à des circonférences concentriques, par exemple. Aussi les instruments à mesurer les angles sont-ils pourvus de semblables appareils. Sur le limbe, on a pris un arc de 29 demi-degrés, et un arc de même longueur sur l'alidade est divisé en 30 parties égales; les différences sont donc précisément d'une minute, et sur un instrument dont les demi-degrés occupent un millimètre à peine, on lit les minutes avec la plus grande facilité. S'il n'y avait pas de correspondance exacte entre deux divisions prises, l'une sur le limbe, l'autre sur l'alidade, deux divisions de cette dernière tomberaient entre deux divisions du limbe; et il est facile de reconnaître que l'erreur faite en prenant l'une ou

l'autre à volonté, serait moindre qu'une demi-division.

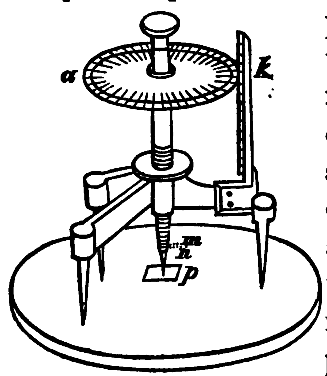
Si l'on divise une longueur de 10 millimètres en 49 parties égales, ce qui est très-facile avec la machine à diviser dont il sera question plus loin, et qu'on divise en 50 une longueur correspondante sur la règle fixe du vernier, ce qui n'est pas plus difficile, l'instrument accusera $\frac{1}{49} - \frac{1}{50}$ de 10, ou $\frac{1}{245}$ de millimètre.

Vis micrométrique. Il est facile de reconnaître que, lorsqu'une vis fait une révolution sur elle-même dans son écrou, un point quelconque *a* de la *tête* de la vis décrit une circonférence égale au contour de cette tête, tandis que l'extrémité de la vis avance d'une quantité égale à la largeur du pas *mn*. Si la vis n'exécute qu'une partie de sa révolution, un dixième, par exemple, le point *a* décrira un dixième de tête, et l'extrémité *n* un dixième de pas. La tête de la vis étant graduée en un certain nombre de divisions égales, dont chacune passe devant un repère fixe *k*, on pourra toujours juger, par le nombre de divisions qui passera, quelle fraction de tour de vis on aura exécutée par un petit mouvement imprimé à la tête, et par conséquent quelle fraction de pas l'extrémité aura parcourue. Que le pas soit, par exemple, d'un millimètre, et le diamètre de la tête 4 centimètres, ce qui donnera 126 millimètres pour la circonférence, cette longueur pourra facilement être divisée en 250 parties égales. Si l'on fait passer devant le repère une division de la tête, on fera

Sphéromètre.

avancer l'extrémité de la vis de $\frac{1}{250}$ de millimètre; 3, 5, 8....31 divisions correspondraient à autant de 250es de millimètre pour le mouvement progressif de l'extrémité. Or, $\frac{1}{250}$ de millimètre représente environ le douzième de l'épaisseur d'un cheveu, et l'on peut exécuter des vis qui mesurent des fractions beaucoup plus petites.

Pour appliquer cet instrument à la mesure de très-petites épaisseurs, on en fait la pièce principale de l'appareil ci-contre. L'écrou est une pièce métallique à trois branches, qui se trouve portée sur trois pieds, dont les extrémités en acier posent sur une plaque de même métal. On voit comment le repère *k* est appliqué à l'appareil, qui porte le nom de *sphéromètre*. Veut-on mesurer l'épaisseur d'une lame mince de *mica*, par exemple? Après avoir placé le sphéromètre sur les trois pieds de son écrou, on pousse la vis micrométrique jusqu'à ce qu'elle atteigne le support commun, ou la plaque d'acier, et l'on note le numéro des divisions de la tête qui touche le repère; puis, remontant un peu la vis, on place sur le support la lame de mica *p*, et l'on fait descendre la vis jusqu'au contact de cette lame. Au repère correspondra alors un numéro de la tête différent du précédent. Soient 5 divisions la différence des deux



chiffres, et 250 divisions sur la tête; il est clair que la vis aura monté pour faire place à la lame de mica, de $\frac{8}{250}$ du pas de la vis. Si celui-ci est d'un millimètre, l'épaisseur de la lame sera $\frac{8}{250}$ ou $\frac{1}{30}$ de millimètre.

Les lames trop légères, comme certaines feuilles d'or, de très-fines membranes, des étoffes, ne sauraient recevoir sans inconvénient la pression immédiate de l'extrémité de la vis. Alors, on les renferme entre deux lames de verre, dont on mesure, comme ci-dessus, l'intervalle, qui est l'épaisseur du tissu. On peut de plus superposer un grand nombre de lames semblables, dont on mesure l'épaisseur totale, qu'on divise ensuite par leur nombre, ce qui offre encore plus de précision. Des fils très-fins, des cheveux peuvent être posés entre les deux lames; mais plusieurs ensemble, et les uns à côté des autres, pour faire une sorte de toile dont on mesure facilement l'épaisseur. Au moyen du sphéromètre, on peut apprécier jusqu'à $\frac{1}{500}$ de millimètre, ce qui revient à $\frac{1}{25}$ de l'épaisseur d'un cheveu.

Machine à diviser.

La vis micrométrique est aussi la pièce principale de la *machine à diviser*. Veut-on marquer un nombre quelconque de divisions parfaitement égales sur une ligne droite ou courbe, comme, par exemple, sur ces petites règles qu'on nomme doubles décimètres, ou sur des têtes de vis? La pièce à diviser est appliquée sur l'appareil, le long duquel elle glisse ou en ligne droite ou en tournant, sous la pression d'une vis à laquelle on

donne des mouvements parfaitement égaux, en se réglant sur le repère. Après chaque mouvement, une plume de diamant se rabat sur la pièce à diviser, et y trace un trait. La parfaite régularité du mouvement de la vis d'impulsion produit nécessairement, dans la division qu'on exécute de la sorte, une exactitude et une précision qui ne laissent rien à désirer.

Balance.

L'application de la balance, comme moyen de mesurer les infiniment petits, consiste à peser les corps pour connaître leur volume, et déduire de cette connaissance, avec celle des dimensions finies de ces corps, celle de ces dimensions qu'on ne peut mesurer directement. Veut-on avoir, par exemple, l'épaisseur d'une de ces feuilles si légères qui servent à la dorure des livres? On en prendra un certain nombre qu'on pèsera toutes ensemble, et, divisant le poids trouvé par le nombre des feuilles, on aura d'abord le poids de l'une d'elles. Soit ce poids, 347 milligrammes. On sait que le millimètre cube d'or battu pèse 20 milligrammes; divisant 347 par 20, on aura 17,3 pour le volume de la feuille en millimètres cubes. Soient 55 millimètres et 45 millimètres la longueur et la largeur respectives de la feuille. Ce sera donc une surface de 55 × 45, ou 2475 millim. carrés, qui, multipliés par l'épaisseur inconnue, donnent le volume 17,3. On obtiendra donc cette épaisseur en divisant le volume 17,3 par la base du parallélipipède 2475, suivant les règles connues de la géométrie. On trouve pour quotient 0,007, c'est-à-dire 7 millièmes, ou $\frac{1}{143}$ de millim.

On déterminerait d'une manière analogue l'épaisseur d'une couche de vapeur, de l'iode, par exemple, qui s'attache par évaporation aux plaques daguerriennes. On pèsera la plaque avant l'iodage, puis une seconde fois après l'opération; la différence des deux pesées donnera le poids de l'iode qui fait l'enduit; et, comme on connaît par la table des densités le poids d'un millimètre cube d'iode, on en conclura le volume de la couche. En la supposant étendue uniformément sur tous les points de la plaque, comme on connaît la longueur et la largeur de celle-ci, on en conclura l'épaisseur par le même moyen que ci-dessus. Ceci suppose que les deux pesées ont donné une différence de poids appréciable. Admettons qu'il en soit autrement, et que la limite de sensibilité de la balance soit un milligramme. On fera un calcul, comme si un milligramme était réellement la différence des poids, et l'on conclura que la valeur ainsi trouvée est supérieure (et de beaucoup peut-être) à l'épaisseur qu'on cherchait.

Microscope. L'emploi du microscope s'appliquera avec avantage surtout aux objets qui ne peuvent être saisis; tels, par exemple, que les animalcules infusoires, les globules du sang, les villosités invisibles d'une foule d'insectes. Pour cela, on placera l'objet à mesurer sur le porte-objet du microscope, dont le grossissement est connu par des procédés que nous exposerons en leur lieu. Soit ce grossissement 350. Il faut avoir les dimensions réelles de l'image, ce qu'on obtiendra en plaçant une règle

finement divisée en dehors de l'instrument, à la distance de la vue nette, et voyant à combien de divisions de la règle l'image semble correspondre. Qu'elle s'applique, par exemple, à une longueur de 11 millimètres et demi; il est clair qu'il faudra diviser ce chiffre par 350, ce qui donne $\frac{1}{30}$ de millimètre environ pour le diamètre de l'objet.

S'il s'agit d'une couche de vapeur, de globules atomiques nageant dans un liquide, ou d'animaux si petits, qu'agrandie par le microscope, leur image soit encore trop restreinte pour qu'on puisse la comparer aux divisions de la règle, dont une seule les dépasserait de beaucoup, on tâchera de déterminer combien de ces atomes tiendraient dans une étendue d'un millimètre carré, marquée sur le porte-objet, ou simplement de comparer leurs dimensions à celle d'un millimètre ou d'une fraction de millimètre vue et agrandie au microscope. Un peu d'habitude met les observateurs à même d'exécuter facilement cette comparaison. C'est ainsi qu'on a trouvé que le diamètre des globules du sang humain n'excédait pas $\frac{1}{800}$ de millimètre, et que les globules de vapeur d'iode, qui forment la couche impressionnable du daguerréotype, n'atteignaient pas un millionième de millimètre d'épaisseur

2. La *divisibilité* de la matière est une propriété dont nous ne saurions déterminer les limites de fait. Nul doute qu'elle ne s'étende jusqu'à un terme que nos moyens sont infiniment éloignés de pouvoir atteindre. Ce que nous pouvons réa-

liser en ce genre est déjà fort remarquable.

Extrême division de la matière.

On sait à quel degré de minceur on peut amener les lames d'or, celles surtout qui recouvrent les fils de galons. Mais, pour ne citer que l'exemple le plus frappant d'atomisation des solides, nous signalerons ces particules d'iode dont nous parlions tout à l'heure, et qui n'ont pas un millionième de millimètre de diamètre. La géométrie prouve qu'il en tiendrait, dans un seul millimètre cube d'iode, un nombre marqué par l'unité suivie de dix-huit zéros. En comparant au volume d'une petite sphère qui aurait pour diamètre celui d'un fin cheveu, on trouve que ce petit corps contiendrait au moins 21,000 milliards de ces molécules d'iode obtenues par évaporation!

On sait que si l'on dissout dans une masse d'eau assez considérable un très-petit fragment d'un sel soluble, et que l'on agite tant soit peu le liquide, le corps dissous se trouve combiné en parties proportionnelles avec toutes les gouttes du mélange; car, quelque part que l'on prenne une de ces gouttes, les réactifs produisent toujours la décomposition de la même manière et en même quantité. Si donc, après avoir dissous dans un litre d'eau un milligramme de chlorure de sodium, par exemple, on prend une seule goutte de la solution pour la mêler à un second litre d'eau pure, qu'on prenne une goutte de cette seconde solution pour l'immiscer à un troisième litre, et ainsi de suite,.... on atténuera indéfiniment le chlorure, et l'on pourra pousser la division de ses molécules à un

degré encore fort supérieur à celui que nous fournit l'exemple précédent. Les réactifs cesseront bientôt, il est vrai, de déceler sa présence dans ces mixtions diverses, précisément parce que les précipités seront atomiques et échapperont à nos sens; mais il est clair que la répartition du sel dissous se fera comme celle des gouttes. C'est ainsi que les médecins homœopathes préparent leurs doses *infinitésimales*.

Pour simplifier le calcul et les idées, nous pouvons opérer cette dissémination d'une autre manière. Supposons, en effet, qu'au premier litre de solution, nous mêlions un litre d'eau pure: chaque goutte du mélange contiendra deux fois moins de sel que dans le premier cas. Mêlons un nouveau litre, et le sel des gouttes égales sera réduit au tiers; avec quatre litres, il sera réduit au quart, et ainsi de suite. Les réactifs cesseront bientôt de parler; mais la répartition, égale entre toutes les gouttes, n'en est pas moins manifeste, quel que soit leur nombre, attendu que toutes sont égales, et chimiquement équivalentes, et parfaitement semblables quant à leur action dissolvante. S'il s'en trouvait une qui fût dépourvue de sel, il n'y aurait pas de raison pour que les gouttes contiguës en continssent plutôt que celle-là; d'ailleurs, deux gouttes contiguës, dont l'une contiendrait du chlorure, se le partageraient comme les deux litres d'eau se sont partagé le sel que contenait l'un d'eux. Les choses se passeront donc de la sorte entre les gouttes, à moins qu'on ne soit arrivé par

la division à des molécules qui soient de véritables atomes, ou physiquement indivisibles. Mais, tant que ce terme, s'il existe, ne sera pas atteint, la division se fera indéfiniment entre toutes les gouttes; et si l'on multiplie sans fin les litres d'eau, si l'on accumule des milliards d'océans, chaque gouttelette, placée sur la pointe d'une fine aiguille, contiendrait quelque particule de sel, et alors les nombres nous manquent pour donner l'idée d'une aussi prodigieuse division de la matière. Si, dans la série de ces atténuations par partage, on se trouvait aboutir au terme où se rencontreraient des molécules insécables, on aurait alors divisé la matière autant qu'il est dans sa nature de pouvoir l'être.

3. Parmi les applications artificielles des moyens que nous possédons pour réduire la matière à des dimensions excessivement petites, nous signalerons la fabrication de ces fils de platine dont se composent les réticules des lunettes astronomiques. On tend un fil de platine d'un millimètre de diamètre dans l'axe d'un moule qu'on remplit d'argent en fusion. Il en résulte un cylindre d'argent à axe de platine qu'on fait passer à la filière, et dont on fabrique un fil qui va en s'allongeant indéfiniment, en même temps qu'il se rétrécit dans une égale proportion. Or, le fil de platine s'allonge de la même manière; car, partout où l'on coupe le fil d'argent, on rencontre le platine. Supposons que le cylindre d'argent ait été changé de la sorte en un fil qui eût 1500 fois sa longueur;

le fil de platine aura donc aussi allongé dans le rapport de 1 à 1500, et son épaisseur sera diminuée à proportion, de sorte qu'il est aisé de calculer à combien s'est réduit son diamètre. Le filage terminé, on plonge le fil dans l'acide nitrique, qui dissout l'argent, et est sans action chimique sur le platine. Il restera donc un fil de ce dernier métal aussi fin qu'on le voudra. On est parvenu à obtenir des fils tels qu'il en faudrait 60 pour former l'épaisseur d'un cheveu, et que, hors des lunettes, on ne peut les apercevoir qu'avec beaucoup de peine.

4. La *porosité* des corps est une propriété qui trouve son application dans une foule de cas. Ce sont surtout les différences qui existent d'un corps à l'autre, qu'on utilise dans les arts et dans les communes circonstances de la vie. Tous les filtres, et les grès filtrants en particulier, ont des pores assez larges pour laisser passer les molécules d'eau, et assez étroits pour arrêter au passage tous les corps solides tenus en suspension dans l'eau, à l'état pulvérulent. La peau de chamois ne laisse pas passer le mercure, à moins qu'on n'exerce sur la surface de ce liquide une forte compression; on en peut donc faire des sacs qui retiennent très-bien le mercure, mais qui sont perméables à l'air: de telles enveloppes peuvent donc servir de cuvettes à des baromètres. D'autres substances sont imperméables même au gaz, mais elles laissent la lumière traverser leurs pores. Tel est le cas du verre en particulier. Porosité.

Élasticité.

5. La *compressibilité* et surtout l'*élasticité* de la matière rencontrent aussi dans les arts des applications nombreuses, et, pour ainsi dire, de chaque instant. Elles sont trop connues pour que nous devions nous arrêter sur ce sujet. Nous nous contenterons de signaler les ressorts de montre, qui servent de moteurs dans une foule d'appareils; les ressorts dynanométriques, qui servent à mesurer toutes les pressions, et dont le peson, ou balance de cuisine, offre un exemple des plus usuels; enfin les ressorts solides de voitures, les ressorts gazeux de coussins et de ballons, sont autant d'applications utiles de l'élasticité de la matière.

CHAPITRE II.

DU MOUVEMENT. — INERTIE. — FORCES. — PARALLÉLOGRAMME DES FORCES. — DÉCOMPOSITION DES FORCES. — FORCES CENTRIPÈTE ET CENTRIFUGE.

6. L'*inertie* de la matière est la persévérance des corps dans l'état où ils se trouvent, état qui ne peut être changé que par l'intervention d'une force suffisante. Si un corps en repos ne se met pas de lui-même en mouvement, un corps en mouvement ne rentre pas spontanément en repos. Si nous le voyons s'arrêter, c'est que son mouvement s'use à la longue par des résistances qu'on rencontre partout, et parmi lesquelles le frottement et l'inertie de l'air sont les principales. Mais, le plus souvent, le mouvement se prolonge assez pour attester l'influence de l'inertie. Inertie.

Une application remarquable de cette propriété des corps se voit dans l'emploi du *volant*, qui fait partie de toutes les grandes machines. On appelle ainsi une roue de fer d'une grande masse, mise en mouvement par le moteur général, et susceptible de continuer à tourner en vertu de la vitesse acquise, alors que le moteur cesserait de fonctionner. La grande quantité de mouvement dont cette lourde roue a fait, pour ainsi dire, provision, la mettrait à même de remplacer le mo- Volants.

teur; et elle le remplace réellement quand, par une cause quelconque, mais peu durable, son action se trouve passagèrement interrompue. Toutefois, le principal usage du volant consiste à régulariser l'action de la machine; car, si cette action s'exagère, l'inertie de la masse du volant oppose une résistance qui paralyse en partie cette action; si, au contraire, elle s'atténue sensiblement, le volant, qui va plus vite, agit alors comme moteur supplémentaire, et ramène, aux dépens du sien, le mouvement de la machine à l'état normal.

7. Lorsque deux forces agissent simultanément sur un mobile, celui-ci suit la diagonale du parallélogramme construit sur ces deux forces. Réciproquement, une force peut toujours se décomposer en deux autres agissant suivant des directions voulues. Le plus souvent, celles-ci sont respectivement parallèle et perpendiculaire à la surface sur laquelle s'opère le mouvement. La force perpendiculaire est élidée; la parallèle est seule efficace. Ces principes trouvent dans la nature une foule d'applications.

Parallélogramme des forces.

C'est en vertu du parallélogramme des forces qu'on maintient un bateau dans le milieu et dans la direction du courant d'une rivière; pour cela, on le fait tirer sur les deux rives par des chevaux qui agissent obliquement au courant; mais la combinaison de leurs efforts donne une diagonale dans la direction de ce courant.

Toutes les fois qu'un corps en mouvement est lancé dans une certaine direction, il suivra néces-

sairement un chemin plus ou moins en dehors de cette direction. D'où il suit que, lorsqu'on est dans une voiture en mouvement, et qu'on veut atteindre un certain point en jetant un projectile par la fenêtre, on n'atteindra pas le point voulu si on le vise directement. Un homme qui, dans un cas semblable, se lance hors de la voiture, en sautant vers un point libre de la route, n'atteindra pas ce point, mais ira tomber plus loin, dans le sens du mouvement de la voiture, et se heurtera contre quelque arbre qu'il n'avait pas d'abord en face de lui. Il faut donc, quand il y a nécessité de se lancer hors d'une voiture, sauter *en arrière* du point auquel on veut aboutir, et d'autant plus en arrière que le mouvement de la voiture est plus rapide. Dans tous les cas, il y a danger, et beaucoup plus qu'on ne l'imagine communément. Nous donnerons un peu plus loin la mesure de ce danger.

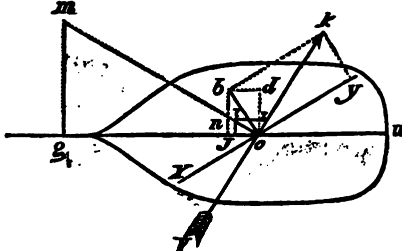
8. La décomposition des forces montre l'influence qu'exerce l'obliquité de l'action. Pour qu'un choc ou une pression quelconque obtiennent le plus d'effet possible, il faut que leur direction se rapproche de la perpendiculaire. Lorsqu'on agit sur un levier, sur les rayons d'un treuil, il faut avoir la précaution de pousser ou de tenir la barre perpendiculairement à son axe, autant du moins que possible.

Dans une foule de cas, au contraire, on se propose de profiter de l'influence de l'obliquité. La théorie de la décomposition de la pesanteur sur

le plan incliné, montre que la force nécessaire pour équilibrer un mobile sera d'autant moindre, que le plan sera plus long pour une même hauteur. D'où il suit que, pour élever facilement une masse, il faut la faire arriver par un plan incliné aussi long que possible; et l'on allonge à volonté un plan incliné entre deux points fixes, en le contournant entre ces points. On obtient ainsi des pentes aussi douces que l'on veut. Les ouvriers font des plans inclinés avec de longues planches, pour élever des masses considérables à de médiocres hauteurs : c'est par un plan incliné en maçonnerie, qu'on a amené l'obélisque de Luxor de la berge de la Seine sur son piédestal. On fait souvent descendre des chevaux et des voitures au fond de puits d'une grande profondeur, et suffisamment larges; le chemin qu'ils parcourent est une rampe qui fait un grand nombre de révolutions autour de l'axe du puits, ce qui la rend très-douce.

Action oblique du vent. 9. C'est par la composition et la décomposition des forces combinées avec la résistance que l'eau offre au mouvement des corps solides suivant la surface qui la pousse, qu'on se rend raison des mouvements qu'un navire exécute dans un sens ou dans un autre, quelle que soit la direction du vent. Soit en effet gu la direction du vaisseau, vo celle suivant laquelle souffle le vent, et que la voile soit orientée selon xy. Soit ok la longueur représentant l'impulsion oblique du vent sur la voile, cette force se décomposera en deux

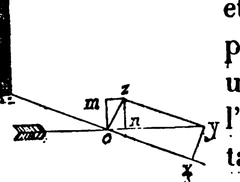
autres, l'une *oy*, selon la voile, l'autre *ob*, perpendiculaire à cette direction. Celle-ci est évidemment la seule agissante et pousse le navire dans la direction *ob*. Mais cette dernière se



décomposera aussi en deux autres, *on*, *od*; la première dans la direction de la quille, la seconde perpendiculairement à cette direction. Ces deux forces pressant contre l'eau ambiante, éprouvent de la part du liquide des résistances très-inégales : celle que rencontre la proue *g* est fort peu de chose en comparaison de celle qui réagit contre le flanc. L'effet de ces résistances revient à détruire une partie des deux forces *on*, *od*, mais les parties détruites sont fort inégales. Soit *oz* ce qui reste de la force *od*, *o*J ce qui reste de *on*, le centre du vaisseau est sollicité par les deux forces *oz*, *o*J, dont la diagonale *o*I est fort différente en grandeur et en direction de la force impulsive *ob*. Le navire marchera donc obliquement dans la direction *o*I*m*; il *tirera une bordée*, ou *louvoiera*; et, quand il sera arrivé en M, il aura avancé sur sa route de la quantité directe *og*. En considérant les circonstances de la figure, on voit que le vaisseau marche *contre* le vent.

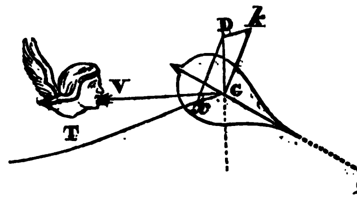
10. L'impulsion du vent sur les ailes des moulins se produit d'une manière analogue, mais plus simple. Les bandes qui forment ces ailes sont des Les moulins.

plans gauches et placés obliquement par rapport à l'arbre du moulin; de cette sorte, une impulsion même perpendiculaire à l'axe frappe obliquement les ailes, et se décompose en deux, *ox* et *oz*. Celle-ci se décompose de nouveau en *on* et *om*; la première desquelles pousse le point *o* de l'aile dans une direction perpendiculaire à l'axe, et qui est celle de la rotation.



Les cerfs-volants.

11. Les cerfs-volants se soutiennent en l'air par un mécanisme analogue. Soit G le centre de gravité de l'appareil contre lequel le vent souffle, et supposons l'action du vent appliquée à ce point. Son action oblique se décompose en deux : l'une, parallèle à la surface, qui ne produit aucun effet d'impulsion; l'autre, perpendiculaire à la surface, la pousse suivant GK. Mais la corde du cerf-volant, qui tire le système suivant une certaine direction Gx, est une force qui se combine avec GK, et qui produit une résultante GD qui pourra être verticale et égale au poids du cerf-volant. Dans ce cas, l'appareil se trouvera soutenu en l'air, et ne tendra pas à tomber. Il y a toujours moyen de tendre la corde de manière à donner à Gx la valeur convenable pour que la résultante GD soit verticale; mais il faut aussi pour cela une certaine valeur à GD,

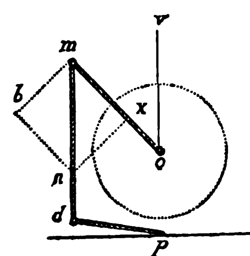


et cet élément dépend de la force primitive du vent. Les petits cerfs-volants que les enfants enlèvent très-près de la terre ne subissent pas, en général, l'action du vent comme dans les hautes régions; ils y suppléent par une traction continue, qui, poussant la feuille de papier contre l'air, produit une résistance qui est l'équivalent d'un souffle; ce qui rentre dans le système précédent. Quant à la queue Q dont on leste ces petits appareils, elle a pour objet de peser sur leur pointe, de manière à placer la surface du cerf-volant dans une position propre à assurer l'impulsion ascendante que le vent doit lui imprimer.

12. Le mouvement progressif que se donnent les poissons, par le jeu de leur appendice caudal, est une application remarquable du parallélogramme des forces. En frappant l'eau d'un côté avec sa queue, l'animal donne naissance à un mouvement en sens contraire, qui le porterait obliquement à la direction qu'il veut suivre; mais comme il frappe très-rapidement l'eau dans un sens symétrique au premier, avant que l'effet du premier choc ait été obtenu, c'est comme s'il frappait simultanément les deux coups, d'où résulte une impulsion intermédiaire entre les deux composantes symétriques, et la diagonale de ce parallélogramme le pousse précisément dans la direction voulue.

13. La décomposition des forces obliques fait comprendre le mouvement de rotation imprimé par les manivelles.

Manivelles. Lorsque la force agit perpendiculairement sur l'extrémité *m* du bras *mo*, elle pousse ce point *m* devant elle, ce qui entraîne le déplacement des autres points jusqu'en *o*; cela se conçoit *à priori* sans difficulté, mais supposons l'action oblique, comme *mn*, par exemple. Alors cette action se décomposera en *mx* et *mb*. La première appuiera contre ce centre de rotation et sera annihilée par sa résistance; il restera donc la force unique *mb*, qui agit dans une direction perpendiculaire, et entraîne le point *m*. Seulement la direction de la force normale change à chaque instant, ainsi que son intensité.



Mais on remarquera qu'il existe deux positions du bras de la manivelle, dans lesquelles la puissance n'agit sur ce bras ni perpendiculairement ni obliquement; ce sont les deux positions verticales, *ov*, par exemple. Or, ici, l'inertie de la matière produit un effet utile : par suite du mouvement acquis, le système tout entier, et le bras de la manivelle continuent leur route, qui pourrait subsister quelque temps sans aucune action de la puissance. Or, le moindre mouvement ramène le bras dans une position oblique, et permet à la puissance d'agir sur lui, comme nous l'avons expliqué.

Force centrifuge. 14. La *force centrifuge* a son origine, comme on sait, dans la force centripète; elle trouve dans la nature et dans l'industrie de nombreuses ap-

plications; nous allons en dire quelques-unes.

Tout le monde a remarqué qu'une toupie mouillée projette autour d'elle, en tournant, l'eau dont elle est couverte; ce qui vient de ce que la force centrifuge que la rotation imprime aux molécules d'eau est beaucoup plus considérable que leur force d'adhésion au bois. Or, on a appliqué cette propriété à des appareils de séchage dans les teintureries. Un arbre vertical traverse un tambour, autour duquel est enroulée l'étoffe à sécher, et est mis en mouvement de rotation rapide par une machine quelconque. L'étoffe, tournant avec le tambour comme la toupie, projette rapidement l'eau qui l'imprègne, et la dessiccation se produit, par ce moyen, au moins cinquante fois plus vite que par les procédés ordinaires. Séchage.

15. C'est par un moyen analogue qu'on renouvelle l'air dans l'intérieur des grands vaisseaux. Un tambour creux et percé sur sa surface est mis en mouvement de rotation rapide, ce qui chasse au dehors l'air contenu dans son intérieur; car il acquiert par la rotation une force centrifuge considérable. Au-dessous du tambour, et communiquant avec son intérieur, se trouve un long tuyau qui débouche dans les chambres dont on veut renouveler l'air; et comme celui du tambour, en s'échappant par les trous de sa surface, laisse un vide, l'air des chambres afflue pour le remplir, et s'échappe à son tour par le même moyen. Il est remplacé dans les chambres d'où il sort, par de l'air amené de l'extérieur du navire. Nous n'avons pas besoin Ventilation.

de faire ressortir l'intérêt qu'offre cette précieuse application de la force centrifuge.

Il existe une autre sorte de ventilateur fort employé dans les usines comme soufflet, et qui ne diffère du précédent qu'en ce que le tambour est fixe, et que, dans son intérieur, on fait tourner un axe à palettes. Ces palettes chassent l'air, qu'elles frappent rapidement, dans un tuyau qui s'ouvre à la surface du tambour; et cet air est remplacé par un autre, qui afflue à l'intérieur du tambour par une ouverture centrale. Si l'on applique cette ouverture à un tuyau de cheminée, il se fait un tirage très-vif, c'est-à-dire que l'air extérieur qui traverse le foyer s'élève rapidement dans le tuyau, ce qui est l'équivalent du soufflage.

Rails-ways. 16. Lorsque les chariots roulent sur un chemin de fer, et qu'ils parcourent les parties courbes des rails, ils subissent une force centrifuge provenant du mouvement curviligne, et qui est d'autant plus grande, que leur course est plus rapide et la courbure des lignes plus considérable. Ils tendent donc vivement à s'en aller par la tangente, ou, autrement, à être jetés hors des rails; d'ailleurs, en vertu de la pression exercée contre ceux-ci par les roues, les rails sont plus ou moins ébranlés. Pour diminuer cette force centrifuge et ses inconvénients, on donne aux courbes les plus grands rayons possibles, et tout l'art des constructeurs s'évertue à augmenter les courbures en prévenant, par des moyens variés, les dangers de l'augmentation de la force centrifuge.

Les écuyers du *Cirque* mettent cette force à profit dans leurs exercices rapides autour du manége. Ils se penchent sans danger vers l'intérieur du cercle qu'ils décrivent, parce que la force centrifuge qui les repousse neutralise l'effet de cette inclinaison. Au lieu de s'asseoir sur leurs chevaux, ils ne font pour ainsi dire que s'appuyer contre eux dans l'intérieur du cercle, la force centrifuge les protégeant contre la pesanteur. C'est ainsi qu'on peut, au moyen d'une corde, faire tourner un verre plein d'eau sans qu'il en tombe une goutte. Tournoiement.

17. On a imaginé récemment, en Angleterre, de faire tourner les hommes comme on fait tourner ces verres d'eau, et cela dans le but de procurer aux amateurs des émotions d'un nouveau genre. Un chemin de fer comme celui que présente la figure, reçoit en *a* un char qui contient les voyageurs, et qui descend d'abord en *b*, comme dans le système si connu des *montagnes russes*. Là, il remonte, en vertu de la vitesse acquise, dans le demi-cercle *bm*V, puis retombe en roulant dans la seconde partie V*nb* de cette circonférence, pour remonter en *d*. Dans tout le trajet *bm*V*nb*, les voyageurs font face au centre du cercle; en V, ils ont la tête en bas; mais ils sont retenus contre le rail par la force centrifuge naissant du mouvement curviligne. Sur ce joujou original, on parcourt une longueur d'environ 60 mètres avec une vitesse

de 50 kilomètres à l'heure. C'est ce qu'on appelle le *centrifugal rail-way.*

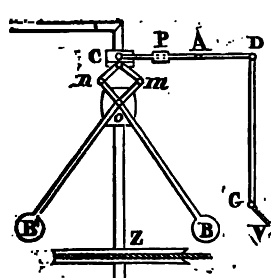
Lorsqu'on tourne sur soi-même, on éprouve en peu de temps un malaise qu'on appelle étourdissement. Cela vient de ce que les liquides et autres parties mobiles de l'organisme intérieur éprouvent alors une force centrifuge qui déplace les vaisseaux, et fait subir au système de l'organisme une sorte de dislocation. A un certain degré de violence, cet exercice serait fort dangereux. Lorsqu'il est exécuté par des enfants en robes, on sait que ces dernières se gonflent circulairement; c'est l'effet de leur propre force centrifuge et de celle de l'air qui en occupe l'intérieur.

Lorsque les thermomètres ne sont pas privés d'air à l'intérieur, il arrive souvent que la colonne mercurielle se divise par l'interposition d'une bulle d'air *np*. Pour rétablir la colonne, on attache le thermomètre avec une ficelle par son sommet *s*, et on le fait tourner rapidement. La force centrifuge repousse la petite colonne séparée *mn* vers le réservoir R.

18. Cette force est utilisée d'une manière remarquable dans des appareils qu'on applique à toutes les machines à feu pour régulariser l'action de la vapeur.

Régulateurs coniques.

L'axe *cz* de cet appareil est mis en mouvement par une corde qui frotte dans la gorge de la poulie *z*. Les deux boules B, B′, sollicitées par la force centrifuge que leur donne la rotation, s'écartent de l'axe, entraînant avec elles leurs tiges qui tournent autour du point *o;* ce qui fait descendre les



coudes *m*, *n*, et par suite la masse C qui pose sur l'angle supérieur et mobile du quadrilatère C*mno*. Ce mouvement fait tourner autour du point A le levier CD, ce qui soulève la tige DG, et par suite la manivelle GV. Si, au contraire, le mouvement de rotation se ralentissait, il est facile de reconnaître sur la figure, que les boules se rapprochant de l'axe, un effet tout contraire aurait lieu, et que la manivelle GV serait poussée en sens contraire. Or, cette manivelle fait tourner, dans l'intérieur du tuyau qui amène la vapeur, une plaque analogue aux clefs des tuyaux de poêles; d'où il résulte que, selon que l'appareil tournera plus ou moins vite, la clef tournera dans un sens ou dans l'autre, et par suite le passage qu'elle permet à la vapeur sera agrandi ou diminué. Donc, si la vapeur agit trop énergiquement, ce qui fera tourner trop vite la poulie et les boules, l'appareil diminuera cette action en fermant un peu la clef; il l'ouvrira dans le cas contraire, et permettra le passage à une plus grande quantité de vapeur, ce qui augmentera l'effet de la machine. D'où l'on voit que l'action restera constante, puisque toute tendance contraire sera immédiatement paralysée par un correctif convenable. Ce petit appareil, dont il est aisé de comprendre l'importance, est connu sous le nom de *régulateur à force centrifuge*.

CHAPITRE III.

DES LOIS DE LA PESANTEUR. — DU PENDULE. — CENTRES DE GRAVITÉ.

Lois de la pesanteur.

19. Les lois de la pesanteur sont représentées par les trois formules suivantes :
$v=gt\ldots(1)\ldots h=\frac{1}{2}gt^2\ldots(2)\ldots v^2=2gh\ldots(3)$, dans lesquelles g est une valeur constante égale à 9,8088, du moins par la latitude de Paris. La lettre v désigne la *vitesse acquise*, après un certain temps de chute représenté par t; h est l'espace parcouru par le corps en tombant. Ces formules répondent à diverses questions qu'on peut se proposer sur les chutes.

Quelle sera, par exemple, la vitesse d'un corps avec 4 secondes de descente? On trouve $v= 9,8088 \times 4=39^m,2352$, c'est-à-dire la même que s'il eût reçu une impulsion instantanée capable de lui faire parcourir 39 mètres par seconde.

En combien de temps un corps tomberait-il d'une lieue de hauteur? La formule $h=\frac{g}{2}t^2$ donne $4000=4,9044\,t^2$; d'où $t=\sqrt{\frac{4000}{4,9044}}=28$ secondes et demie.

Quelle serait la vitesse acquise par un corps tombant de 20 mètres de haut? La formule (3) donne $v=\sqrt{19,6176\times 20}=19^m,8$, ou à peu près 20 mètres.

Ceci nous donne le moyen de faire une comparaison importante, que nous recommandons très-particulièrement à l'attention de nos lecteurs.

Lorsqu'un homme saute hors d'une voiture en mouvement rapide, il doit nécessairement tomber la tête contre terre ou à peu près, comme nous le prouverons ci-dessous; mais tombât-il même sur les pieds, il est à peu près sûr qu'il se tuera, s'il est sur un chemin de fer, avec la vitesse commune des trains sur ces sortes de routes. Supposons en effet la vitesse ordinaire de 8 lieues ou 32000 mètres à l'heure, ce qui revient à environ 9 mètres par seconde. Ce mouvement se combinant avec l'élan transversal de l'individu, ce qui correspond au moins à 5 mètres, puisque tel est l'effet par seconde de la seule pesanteur qui l'amène à terre, il en résulte la diagonale d'un parallélogramme rectangle, qui aurait pour côtés respectifs 9 et 5, ou environ 10,3 de vitesse. Si nous nous demandons quelle est la hauteur de chute qui donne une telle vitesse acquise, nous la trouverons par la formule (3) qui devient $\overline{10,3}^2 = 19,6176\,h$; d'où $h = 5^{m},4$. Or, telle est à peu près la hauteur d'un premier étage au-dessus des entre-sols. L'effet serait donc le même que si la personne sautait de cette hauteur sur le pavé, indépendamment de la chute nécessaire sur le flanc quand elle s'élancera d'une voiture. On voit par là quelle imprudence commettent les voyageurs qui ne craignent pas de

Chute hors des voitures.

s'exposer à ce danger, et nous montrerons plus loin que ce danger est aggravé considérablement par la circonstance de l'obliquité de la chute.

Pendule. 20. Le *pendule* est un appareil que l'isochronisme de ses oscillations rend précieux dans bien des cas, et qui est d'une utilité de premier ordre par son application aux horloges. On sait que, dans ces intruments, le haut de la tige du pendule porte une pièce ancrée qui, par suite des oscillations du balancier, arrête et abandonne successivement les dents d'une roue qui reçoit l'action du moteur et la transmet aux autres pièces de la machine. A chaque instant le mouvement de l'horloge est arrêté, et à chaque instant il recommence; de sorte qu'au lieu d'être continu, il se compose d'une succession de mouvements instantanés, espacés par de très-petits intervalles de temps, toujours égaux et semblables, comme les oscillations isochrones du pendule qui les dirige. Sans cette interruption continuelle du mouvement commencé, l'action des moteurs, quels qu'ils soient, s'accélérerait indéfiniment, et l'uniformité, qui est la propriété fondamentale et le but du jeu des appareils mesureurs, n'existerait pas, ce qui en rendrait l'usage illusoire ou même tout à fait nul.

Mesure de la pesanteur. 21. On peut employer les oscillations pendulaires à reconnaître et à mesurer la variation de la pesanteur aux différents points de la surface du globe. Car, comme c'est la pesanteur qui produit la chute du pendule quand on écarte sa tige de la

verticale, on conçoit que toute variation dans l'intensité de la pesanteur doit influer sur la durée des oscillations, de sorte qu'il s'en produira un nombre plus ou moins grand dans un temps donné. C'est ainsi qu'on a reconnu que la pesanteur allait en croissant de l'équateur aux pôles; et, comme il est admis en principe que la pesanteur augmente à mesure qu'on se rapproche du centre de la terre, on en a conclu le renflement équatorial et l'aplatissement polaire, dont on a pu même donner la mesure d'après celle des oscillations.

22. C'est à l'emploi du pendule que l'on doit la connaissance précise de l'espace que parcourent les corps en tombant pendant une seconde, dans le vide, et pour un lieu donné. Cette détermination ne saurait résulter d'une expérience directe, en faisant tomber un corps pendant un temps donné; une foule de causes, dont la principale est la rapidité de la chute, rendent impraticable l'emploi de ce moyen. Or, il existe entre la durée des oscillations d'un pendule, sa longueur, la nature de la courbe qu'il décrit, et l'intensité de la pesanteur, une relation que les physiciens ont trouvée, et qu'ils expriment par la formule $T^2 = \frac{\pi^2 l}{g}$. La lettre T représente le temps d'une oscillation, l la longueur du pendule, π le nombre 3,1415926, g le double de l'espace qu'un corps doit parcourir en tombant pendant une seconde. Si donc on fait osciller un pendule d'une longueur connue l, pendant un certain

temps, une heure par exemple, mesurée sur la révolution sidérale, et divisant une heure ou 3600 secondes par le nombre des oscillations, on aura la durée de chacune avec une précision très-grande, ce sera la valeur de T. Tout sera donc connu dans la formule, excepté g, qui est la quantité que l'on cherche, et pour laquelle on a $g = \frac{\pi^2 l}{T^2}$, valeur facile à calculer en mettant pour π, l, T, leurs valeurs connues. C'est ainsi qu'on a trouvé pour Paris et dans le vide $g = 9,8088$; d'où $\frac{g}{2} = 4^m,9044$; tel est l'espace parcouru par un corps dans la première seconde de sa chute. Les espaces sont plus considérables dans les secondes suivantes, et ils sont donnés par la formule $h = \frac{g}{2} t^2$. Il faut mettre cette valeur de h dans les trois formules de la page 30, pour résoudre toutes les questions du genre de celles dont nous avons donné des exemples. La valeur de g est donnée, il est vrai, pour le cas de la chute dans le vide; mais quand le corps a un poids considérable et est d'une certaine densité, la résistance de l'air ne produit aucune diminution sensible dans la vitesse de sa chute.

23. Les formules des physiciens se rapportent à un pendule *simple*, c'est-à-dire à un point pesant suspendu à une ligne droite. Tous les pendules réels sont plus ou moins composés, et s'écartent plus ou moins de l'hypothèse normale; on connaît particulièrement les balanciers à châssis, ainsi construits dans un but que nous étudierons plus tard. Mais étant donné un pendule composé,

il y a toujours moyen d'assigner la longueur du pendule simple équivalent, ou qui ferait les oscillations dans un temps égal. Il y a pour cela des formules, mais les praticiens y parviennent par le tâtonnement.

Or, on peut faire un pendule théoriquement composé, mais d'une composition si simple, qu'on puisse l'assimiler à un pendule simple de même longueur. Il suffit pour cela de prendre une balle de fusil, d'y percer un trou dans lequel on engage l'extrémité d'un fil qu'on recouvre en bouchant le trou avec les bavures de ses bords. Ce fil à balle peut être réputé un pendule simple, dont le point pesant est le centre de la balle. La durée des oscillations dépendra de la longueur qu'on voudra donner au fil entre ce centre et le point de suspension.

Voici comment on formera dans ce genre un pendule à secondes, dont l'emploi peut être fort commode dans une foule de cas. La formule pendulaire donne pour la longueur l, l'équation $l = \frac{gT^2}{\pi^2}$. On a $g = 9{,}8088$; $T = 1$, puisque les oscillations doivent durer une seconde, et $\pi = 3{,}1415926$, d'où $l = 0^m{,}9938$ ou 994 *millimètres*. Telle est la longueur du fil qu'il faut prendre pour le *pendule à secondes*, à partir du centre de la balle. Rien n'est donc aussi facile à exécuter que cet appareil, qui, quoique calculé pour Paris, peut servir à des latitudes notablement différentes de celle de cette ville. Pendule à secondes.

24. Les propriétés des *centres de gravité* trou- Centre de gravité.

vent une application continuelle, soit dans la nature, soit dans les arts. Le principe fondamental de l'équilibre consiste en ce que la verticale qui passe par le centre de gravité soit appuyée ou soutenue, c'est-à-dire tombe entre des points d'appui fixes. Il y a pour l'homme, dans une position donnée, une limite d'inclinaison au delà de laquelle il y a chute nécessaire, parce que la verticale de gravité sort de l'espace circonscrit par ces points fixes. Quand il est entraîné d'un côté par quelque impulsion ou quelque poids accidentel, il se rejette en sens contraire, pour ramener au-dessus du contour d'appui le centre de gravité du système. Avec un fardeau sur le dos, il se porte en avant; le vieillard courbé par l'âge, et dont le centre de gravité se projette en avant des pieds, augmente au moyen d'un bâton le contour d'appui. Les funambules, dont le centre de gravité doit toujours rester au-dessus de la corde qui les porte, jettent leur lourd balancier du côté opposé à celui vers lequel ils penchent.

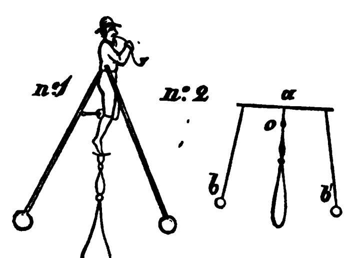
Pour donner aux corps le plus de stabilité possible, il faut leur donner une base ou place d'appui aussi large qu'il se pourra; car il faudra des actions plus considérables pour amener le centre de gravité hors de cette base. On rencontre parfois des guéridons, des vases de diverses formes, qui, sous ce rapport, sont mal entendus.

25. Quand les corps ne sont pas homogènes, il faut faire en sorte que le centre de gravité soit

aussi bas que possible; il est aisé de reconnaître que, dans cette condition, il faut aussi un plus grand effort pour l'amener hors de la base d'appui. C'est de quoi l'on prend soin dans l'arrimage des vaisseaux, dont on charge fortement le fond. Les cabotins, ou petites figures dont la partie inférieure est composée de matière lourde, retombent toujours sur leur pied, lorsqu'on les jette en l'air, tandis que la partie moins lourde se relève; cela tient à ce que le centre de gravité du système réside dans la partie lourde, que c'est sur ce point que la pesanteur concentre son action, et que c'est par conséquent le point qu'elle pousse vers la terre; les autres se disposent en conséquence seulement de leur liaison avec lui. Donc ce point doit descendre aussi bas que possible.

Règles d'équilibre.

On explique d'une manière analogue, le jeu de ces petites figures qui se tiennent et se tournent sur la pointe d'un pied, de quelque manière qu'on les incline. Sans les boules de plomb qui les lestent, il leur serait impossible de se tenir, car fussent-elles d'abord en équilibre, le moindre souffle d'air ferait sortir leur centre de gravité de cet unique point d'appui. Mais le centre de gravité du système est situé entre les boules; et, de quelque manière qu'on incline la petite figure, on relève le



centre de gravité : or celui-ci, abandonné à lui-même, doit toujours tomber; les boules descendront donc lorsque l'appareil sera abandonné à lui-même, et reguinderont la figure.

L'appareil n° 2 repose entièrement sur les mêmes principes. Une planchette que surmontera, si l'on veut, une figure ou un corps quelconque assez léger, supportera par ses extrémités des tiges avec deux balles de plomb. Au-dessous et au milieu de la planchette se trouve fichée une épingle. Or, on pourra supporter tout l'appareil avec une pointe d'aiguille ou de canif appliquée à la tête de l'épingle en *o*; car toute tendance à la chute, par suite d'une secousse ou d'une inclinaison donnée, sera neutralisée par les boules que cette chute relèverait, et qui tendent plus puissamment que le reste de l'appareil à occuper la région la plus basse.

C'est par un raisonnement semblable qu'on explique pourquoi l'on fait tenir une assiette sur la pointe d'un couteau appliquée à son creux, tandis que l'équilibre serait impossible si la pointe était appliquée à la base.

Danger des chutes.

26. Enfin, nous pouvons compléter ici ce que nous avons annoncé des effets que produit le saut hors d'une voiture en mouvement rapide (23). Dans l'exemple choisi, nous avons vu un homme tombant sur ses pieds comme d'une hauteur de $5^{m},4$. Mais c'est au centre de gravité de l'homme que l'impulsion s'applique, et cette impulsion se fait obliquement de haut en bas, puisqu'elle va

du plancher de la voiture sur le sol. Quand donc l'homme arrive en *p* sur ses pieds, son centre de gravité est poussé dans la direction *ot* de la ligne qu'il vient de suivre; il est donc dans le même cas que si, étant d'abord immobile, il recevait un coup vigoureux qui le poussât dans cette direction. Donc il doit faire la culbute en tournant sur ses pieds, et s'étaler violemment sur le sol. Donc enfin, l'homme qui s'élance dans les conditions mentionnées, est dans le même cas que celui qui tomberait d'une hauteur de 5^{m},4, la tête la première. Il en faut souvent beaucoup moins pour se la briser; et, très-communément, les imprudents qui se livrent à cette épreuve se tuent sur la place.

CHAPITRE IV.

DES MACHINES. — MOYEN D'ÉVALUER LEUR PUISSANCE. — APPLICATION AUX PLUS SIMPLES. — PARTICULARITÉS SUR LA BALANCE. — MESURE DE L'EFFET UTILE DES MACHINES.

Principe de l'équilibre des machines.

27. Dans tout choc ou simple pression, l'effort exercé est proportionnel à la masse du corps choquant; car le choc d'une masse de 5 kilogrammes, par exemple, est équivalent à celui de cinq masses d'un kilogramme.

Il est aussi proportionnel à la vitesse du choc; car une vitesse de 8 mètres, par exemple, peut être considérée comme le produit de 8 forces capables chacune d'un mètre; l'effort vaut donc 8 fois celui d'une seule force capable d'un seul mètre.

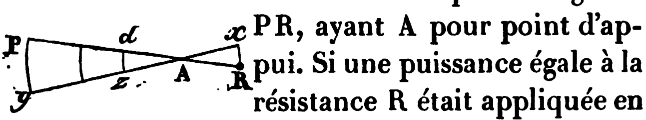
D'où il suit que la masse et la vitesse entrent toutes deux comme facteurs dans l'expression numérique de la puissance d'un choc ou d'une pression, et l'on dit que la *quantité de mouvement* est mv, ou le produit de la masse par la vitesse. Et si deux forces agissent l'une contre l'autre en sens contraire, il y aura équilibre entre elles quand les vitesses seront en rapport inverse des masses, car dans ce cas les deux produits seront égaux. Pour déterminer le triomphe de l'une des

deux, il suffira d'ajouter une quantité infiniment petite ou à sa vitesse ou à sa masse.

Lorsqu'une force ou un mobile en voie de se mouvoir et de pousser un obstacle, est arrêté par une puissance égale ou supérieure à la sienne, on doit prendre pour sa vitesse celle avec laquelle *elle tend* à se mouvoir; car il est clair que la pression est proportionnelle à cette tendance. C'est ce que l'on appelle une *vitesse virtuelle*. Vitesses virtuelles.

Or, nous pouvons poser en principe que la mesure de l'énergie d'une machine ou du secours qu'elle prête au bras de l'homme, est le rapport qui existe entre le chemin que parcourt sa puissance et celui que décrit la résistance dans le même temps. C'est ce que nous allons éclaircir par quelques exemples.

28. Considérons un levier du premier genre Levier.



PR, ayant A pour point d'appui. Si une puissance égale à la résistance R était appliquée en *d*, à égale distance du point A, il est évident que ces deux forces qui tendraient à faire tourner le levier en sens contraires, et qui sont d'ailleurs semblables en tout, se feraient équilibre. Au lieu de placer la puissance en *d*, mettez-la au point P, à une distance trois fois plus considérable que A*d*. Il est clair que, dans le mouvement de rotation du levier, elle décrirait une circonférence d'un rayon triple, ou trois fois plus considérable. Sa vitesse serait donc triple, et par conséquent la pression qu'elle exerce en P est triple aussi. Elle

est donc trois fois plus forte qu'il ne faut pour que l'équilibre ait lieu ; donc on maintiendra cet équilibre en remplaçant la puissance P par une force trois fois moindre. Un kilogramme avec le bras de levier 3, équilibrera donc trois kilogrammes agissant par le bras de levier 1. Ajoutons à la puissance une quantité infiniment petite, pour détruire l'équilibre en sa faveur, le mouvement aura lieu, et les arcs parcourus étant entre eux comme les rayons, seront comme 3 est à 1. La puissance fait donc trois fois autant de chemin que la résistance; or, d'après ce que nous venons de voir, cette machine triple son action, ce qui justifie notre énoncé en ce qui concerne le levier du premier genre. Mais un raisonnement analogue s'appliquerait à toutes les autres machines simples.

29. Ainsi donc, en général, autant de fois le chemin fait par la puissance contient celui que parcourt la résistance, autant de fois la machine répète l'action de la puissance qui s'y applique, et cette appréciation est très-facile à faire. Mais le chemin parcouru par la résistance ou l'obstacle à vaincre est évidemment la mesure du travail effectué par la puissance; d'où il suit que ce travail est en rapport inverse de l'énergie de la machine. Plus une machine est puissante et efficace, plus lentement elle produit son effet : *ce que l'on gagne en puissance, on le perd en vitesse;* tel est le principe que, dans le calcul des machines, on doit toujours avoir présent à l'esprit.

Dans le treuil, le rapport se trouve comme sur le levier. La mesure de l'efficacité de la machine est le nombre de fois que la longueur des barres transversales contient le diamètre du cylindre.

Dans la poulie fixe, la puissance et la résistance font évidemment des chemins égaux. Ces forces doivent donc être égales dans le cas d'équilibre, et cette poulie n'aide la puissance que par la meilleure disposition qu'elle lui donne.

Dans la vis, la puissance décrit toute la circonférence de la tête, tandis que la résistance avance d'une quantité égale au pas; le calcul de l'énergie est facile à faire.

Le levier et le treuil se montrent dans une foule d'instruments employés par l'industrie. Dans l'un ou l'autre rentrent les clefs et les manivelles de toutes sortes, les ailes de moulins et des roues hydrauliques. La vis se montre dans les presses de graveur, dans les balanciers qui fabriquent la monnaie. Nous ne nous arrêterons pas sur une description de ces diverses machines, qui appartiennent aux traités de mécanique industrielle : nous dirons seulement quelques mots sur les diverses sortes de balances, et nous commencerons par la balance commune.

30. Cet appareil est un levier à bras égaux, dont les extrémités portent des bassins d'égal poids, et suspendu par un point situé au-dessus de son centre de gravité, sans quoi le fléau culbuterait continuellement. Si ces conditions sont bien remplies, il est évident que des masses égales Balance.

placées dans les deux bassins se feront équilibre, et que, par conséquent, le poids d'un corps situé dans l'un des deux sera donné par les kilogrammes et grammes qui le contre-pèseront dans l'autre.

Si les bras de la balance ne sont pas parfaitement égaux, l'équilibre sera établi par des masses inégales quand elles seront en rapport inverse des bras de levier. Une balance, dans ces conditions, sera un instrument de fraude, si la marchandise est placée dans le bassin du plus long bras; si celui-ci est plus long d'un dixième, par exemple, que le bras opposé, le poids qu'il porte pourra être d'un dixième plus faible que celui de l'autre bassin. Dans tous les cas, une balance doit être préalablement vérifiée.

Or, il existe d'abord un moyen fort simple de vérifier l'exactitude de la balance. Qu'on place dans les deux bassins des corps quelconques jusqu'à ce que l'équilibre soit établi. Puis, cela fait, qu'on change les corps de bassins; si la balance est exacte, l'équilibre devra subsister encore, cela est évident : si donc, au contraire, l'équilibre est rompu, c'est une preuve de l'inexactitude de la balance. Cette conclusion est manifeste, à part toute théorie. Pour exécuter cette opération, on peut prendre les premiers corps qui tombent sous la main, et particulièrement de l'eau. Mais si l'on avait à sa disposition des poids marqués, grammes, etc., il est clair que, pour vérifier la balance, il suffirait d'en mettre des quantités égales dans les deux bassins.

31. Mais étant donnée une balance inexacte, on peut peser avec elle tout aussi bien que si elle était bonne, et cela par la méthode *des doubles pesées.*

Soient B et B′ les deux bassins. On mettra dans le bassin B le corps à peser, et dans le bassin B′ quelque chose qui lui fasse équilibre, et qu'on puisse fractionner autant que l'on voudra, comme de l'eau, du sable. Cet équilibre ne prouvera pas l'égalité des masses qui occupent respectivement les deux bassins; mais si, dans cet état de choses, on ôte du bassin B le corps à peser, pour substituer des grammes à sa place, jusqu'à nouvel équilibre, ces grammes marqueront précisément le poids du corps; car, dans les mêmes circonstances, c'est-à-dire à l'extrémité du même bras de levier, et sans que rien soit changé d'ailleurs, ce corps et ces grammes exercent la même pression et équilibrent la même masse placée dans le bassin B′. Cette méthode est toujours applicable quelle que soit l'inégalité de longueur des bras, et l'inégalité en poids des bassins. Et il s'ensuit qu'avec la balance la plus mauvaise, on peut peser aussi exactement que si elle était bonne. Ce résultat est d'une très-grande importance. Dans les pesées de précision, on emploie toujours cette méthode, même lorsqu'on a lieu de croire à la bonté de la balance.

Méthode de la double pesée.

32. Du reste, la précision d'une pesée dépend de la sensibilité de l'instrument. Une balance étant en équilibre, et l'aiguille perpendiculaire au fléau,

pointant au zéro de l'arc qui le surmonte, on pourra surcharger l'un des bassins d'un ou plusieurs milligrammes, centigrammes.... sans qu'aucun mouvement se manifeste. Cela tient à ce que le frottement de l'axe du fléau sur sa suspension est une résistance supérieure à la pression de la petite surcharge; et la sensibilité de la balance dépend, sous ce rapport, de la manière dont les pièces de la suspension s'appliquent l'une à l'autre : elle est d'autant plus grande que les surfaces de contact sont moindres et plus polies. On dit qu'une balance est sensible à 2 centigrammes, quand elle ne trébuche que sous une surcharge égale à ce poids. Du reste, le frottement ne dépend pas seulement de l'étendue et de l'état plus ou moins poli des surfaces, il dépend aussi du poids qui presse sur les points d'appui; aussi la sensibilité n'est-elle pas absolue; et pour qu'une balance soit sensible à un demi-milligramme, par exemple, ce qui est la limite qu'on ne saurait dépasser, il ne faut jamais lui faire porter qu'un demi-kilogramme au plus. De telles balances doivent être conservées avec beaucoup de soin, à l'abri de l'air. Lorsqu'on veut les employer, s'il se trouve qu'*à vide* l'aiguille de la balance ne pointe pas au zéro, on met dans le bassin qui l'exige une légère *tare*, telle que de petits morceaux de papier, qui ramèneront l'aiguille à zéro, et qu'on conservera pendant toute l'opération.

Romaines. 33. On emploie plusieurs autres sortes de balances qui se rapportent au levier; ce sont prin-

cipalement les *romaines* à poids mobile, et les balances à bras réduit.

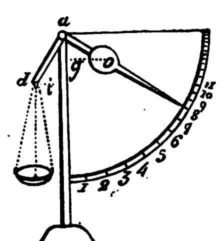
Dans les romaines, on fait mouvoir un poids mobile le long d'un bras de levier divisé ; les divisions sont égales à la longueur du plus petit bras auquel est suspendu le bassin. Quand, par suite de ce mouvement, l'équilibre se trouve établi, ce que l'on reconnaît par l'horizontalité du fléau, ou mieux par l'indication d'une aiguille, le poids du corps à peser est égal à autant de fois le poids mobile que le numéro auquel celui-ci a été arrêté, contient de divisions. Si le poids mobile est le kilogramme, et qu'il s'arrête au n° 7 $\frac{1}{2}$, son bras de levier étant 7 fois $\frac{1}{2}$ plus long que celui que porte le bassin, sa masse est 7 fois $\frac{1}{2}$ moins considérable que celle du corps à peser. Donc celui-ci sera 7 kil. $\frac{1}{2}$; de sorte que la lecture du numéro d'arrêt donne immédiatement le poids du corps. Cette balance offre des avantages et des inconvénients trop longs à détailler; en somme, l'emploi paraît en être assez restreint, ce qui prouve qu'il est jugé peu commode.

34. On emploie davantage, surtout pour peser les masses considérables, les balances à bras réduit. Si l'on a un levier dont les bras soient l'un d'un mètre, l'autre d'un décimètre seulement, il faudra, pour équilibrer un corps placé à l'extrémité de ce dernier, appliquer au plus long bras un poids dix fois moins considérable. Tel est le système des balances au dixième qu'on emploie aujourd'hui si communément pour peser le bois

dans les chantiers, les bagages et les ballots dans les bureaux de roulages et de messageries. Les avantages de ces balances consistent en ce qu'elles occupent peu de place, qu'elles n'exigent l'emploi que de poids peu considérables et faciles à manier, et en ce que le point d'appui de tout le système est beaucoup moins chargé que dans les cas ordinaires; car la charge n'est que les six dixièmes de celle que supporterait une balance à bras égaux: celle dont il s'agit gagne donc par là plus de sensibilité et de solidité tout à la fois.

Balance angulaire.

35. Il existe un autre système de balance rentrant dans le même principe, et auquel on a donné le nom de *peson;* mais ce mot étant appliqué à plusieurs sortes d'appareils, je proposerais de désigner celle-ci par le nom de *Balance angulaire.* Elle consiste en un levier coudé dont les deux bras sont à angle droit; le plus court porte un bassin dans lequel on met le corps à peser, le plus long est une lourde aiguille qui forme contre-poids et qui se meut le long d'un axe métallique convenablement gradué.



On reconnaît théoriquement que le corps à peser agit par le bras de levier *di*, et le poids de l'aiguille par celui *og*, le poids *o* étant le centre de gravité de l'aiguille. Plus le poids placé dans le bassin est considérable, plus l'aiguille remonte le long de son arc, mais en réagissant davantage. On conçoit que si, pour graduer

l'arc, on a chargé le bassin successivement de 1, 2, 3, 4,..... kilogrammes, avec fractions, et qu'on ait marqué les positions correspondantes que prend successivement l'aiguille, on reconnaîtra désormais sur-le-champ le poids d'un corps placé dans le bassin, par le numéro de l'arc vers lequel l'aiguille pointera. Ceci est encore facile à comprendre indépendamment de toute théorie. L'emploi de cette balance est très-facile et très-commode; mais elle cesse d'être suffisamment sensible quand elle porte des poids très-forts; car alors les mouvements de l'aiguille sont très-faibles pour un kilogramme de plus.

36. Enfin, il existe d'autres balances qui ne rentrent pas dans le levier, et qui sont fondées hors de toute théorie sur l'action d'un ressort d'acier. Elles appartiennent au système des dynamomètres, dont nous aurons à nous occuper plus loin. Nous terminerons ce chapitre par ce qui concerne l'appréciation de l'*effet utile* des machines.

Mesure de l'effet utile des machines.

L'effet utile d'une machine ou d'une force quelconque a pour mesure le travail effectif que peut rendre cette force dans un temps donné, ou simplement dans l'unité de temps, pour laquelle on prend la minute. Ce travail est évidemment proportionnel, toutes choses égales d'ailleurs, à la masse mise en mouvement; il est aussi proportionnel au chemin qu'on lui fait faire : ainsi, une force qui, dans un même temps, élève une masse à une hauteur double, est évidemment une force double quant à l'effet utile qu'elle produit. Aussi

dit-on que l'effet a pour mesure la masse multipliée par la hauteur. Or, on a...(23)... $v^2=2gh$... d'où $h=\frac{v^2}{2g}$...d'où...effet utile $=m\frac{v^2}{2g}$. On peut, dans la comparaison de deux forces, supprimer $2g$, puisque c'est un facteur constant dans un même lieu; d'où effet $=mv^2$, ou le produit de la masse par le carré de la vitesse. C'est ce produit qu'en mécanique on appelle la *force vive*.

37. On prend pour unité de mesure dynamique, une masse de 1000 kilogrammes élevés à un mètre dans l'unité de temps, et l'on désigne cette unité de force par le nom de *dynamie*. Reprenant le produit mh pour l'expression de l'effet, on voit qu'une machine qui élèverait une masse de 2700 kil. à $3^m,5$ en une minute, produirait $\frac{2700 \times 3,5}{1000}=9,45$ dynamies. Celle qui élèverait 11000 kilog. à $1^m,10$ donnerait 12,1 dynamies.

On peut évaluer de la sorte le travail des machines ou des forces à effet constant, des machines à-vapeur, par exemple. On sait d'ailleurs que la puissance de celles-ci est ordinairement exprimée en force de chevaux. C'est quelque chose de très-variable et de très-arbitraire que la force d'un cheval; mais on est convenu de représenter cette force par 4,5 dynamies, ce qui revient à 270 dynamies par heure.

Mais il n'est pas possible de fixer la valeur du travail d'un homme ou d'un véritable cheval, parce que, d'une part, cette valeur dépend de la qualité matérielle des agents et de la durée de leur travail; et que, d'autre part, elle dépend du mode

selon lequel leur action s'exerce. Ainsi, suivant qu'il monte ou qu'il marche, qu'il pousse ou qu'il tire, qu'il est chargé d'une façon ou d'une autre, l'homme ou le cheval produiront des effets différents. En se plaçant dans des circonstances identiques, on peut obtenir des résultats constants et appréciables, ou du moins des moyennes d'une certaine valeur. Ainsi, l'on admet qu'un cheval attelé à un manége donne, pendant une journée de huit heures, 1148 dynamies. Un homme *moyen*, dans une journée de six heures employée à *monter* des fardeaux le long d'un escalier, donne 56 unités dynamiques; par le transport, ou marchant sur un terrain horizontal, il en donne 630. Mais de pareilles évaluations ne sont acceptables que comme moyenne sur un grand nombre d'individus; elles seraient complétement illusoires, si on voulait les appliquer à un seul homme ou à un seul cheval, dans chaque cas donné.

CHAPITRE V.

ÉTAT MOLÉCULAIRE DES CORPS. — TÉNACITÉ. — COMPRESSIBILITÉ. — ÉLASTICITÉ. — RESSORTS DE TOUS GENRES. — CHOC DES CORPS. — PENDULE BALISTIQUE. — RÉFLEXION. — BILLARD. — RÉFRACTION.

Propriétés de l'état moléculaire.

38. Tous les corps possèdent une constitution, et par suite un volume, qui sont réglés à chaque instant par des forces internes, et peuvent être modifiés par des forces extérieures. Dans un instant donné, tout corps a un volume qu'on peut faire varier au moyen de la pression ou de la traction. Mais toute tendance au changement subit une réaction en sens contraire. Si l'on rapproche par la compression, par exemple, les molécules du corps que les forces internes tenaient à une distance déterminée, ces forces repoussent la puissance comprimante, et la repoussent avec une énergie qui croît avec la continuité de l'action. Il vient un moment où la réaction interne neutralise complétement celle-ci : c'est la limite de la compressibilité.

Tout corps qui se comprime ne cède donc aux efforts que jusqu'à une certaine mesure. Mais cette limite atteinte, le corps comprimé, ou conserve l'état réduit auquel a pu atteindre la force comprimante, ou bien, quand celle-ci cesse d'agir et

d'équilibrer sa réaction interne, il se débande et reprend son volume et sa forme primitifs. Dans le premier cas, le corps est simplement compressible; dans le second, il est élastique. Mais l'élasticité peut être complète ou incomplète; et, dans ce dernier cas, elle affecte les corps à une foule de degrés dynamiques.

39. La résistance à la traction se nomme *ténacité*, et cette force a, dans chaque corps, une limite, qui est la rupture, par suite de l'éloignement des molécules au delà de leur sphère de cohésion. La ténacité est très-inégale dans les différents corps, et sa mesure dans chacun est très-utile à connaître. On l'a déterminée, pour les métaux entre autres, en faisant porter à des fils d'un même diamètre des poids qu'on augmentait jusqu'à rupture. Ainsi, l'on a trouvé que des fils de fer d'un millimètre de diamètre portaient jusque-là un poids de 61 kil. environ. Le cuivre battu porte 25; le platine, 32; l'argent, 21; l'or, 17; le plomb, 1,35. Le fer forgé est moins tenace que le fer filé, dans le rapport de 61 à 42. C'est pour cela qu'on emploie des cordes de fer filé pour soutenir les ponts suspendus au lieu de barres de fer forgé qui auraient la même section. Une corde composée de 30 fils de fer ayant chacun trois millimètres de section, peut supporter un poids de 16,000 kilogrammes. Ténacité.

On sait, depuis Galilée, que les cylindres creux résistent mieux à l'écrasement et à la rupture que les cylindres pleins de même poids et de même

hauteur, pourvu toutefois qu'il y ait un certain rapport entre le cylindre vide intérieur et la partie pleine. Cela vient de ce que les divers segments des anneaux s'arc-boutent mutuellement, quand, par l'effet de la pression, ils tendent à rentrer dans l'intérieur; ce qui n'a pas lieu quand le cylindre est plein, parce que les parties centrales, en s'écrasant, repoussent les segments des anneaux. Aussi fait-on volontiers usage de colonnes de fer creuses préférablement aux colonnes pleines.

Les piliers et colonnes de bois supportent aussi une très-grande pression dans le sens de leurs fibres. Un pilier de buis porte près de 1400 kil. par centimètre carré; par conséquent, une section de quatre décimètres en supporterait plus de 500,000. Dans les mêmes conditions, le chêne ordinaire en porterait 250,000; le sapin, 330,000; le frêne, 475,000. Il est inutile de faire observer que ce sont des limites dont il faut se tenir éloigné dans l'application, pour ne pas compromettre la solidité des constructions.

Compressibilité. Les corps simplement compressibles résistent à la force qui les presse, en ce sens qu'ils lui cèdent de moins en moins à mesure que l'action s'exerce contre eux; mais sans produire de répulsion, comme le font les corps élastiques. La réduction de volume qu'ils subissent constitue le *tassement*. Les édifices, les ponts, tous les grands ouvrages, subissent un tassement sensible lorsqu'on les abandonne à eux-mêmes, en enlevant les pièces de charpente qui en soutenaient les diverses par-

ties. Le corps humain lui-même, sous la pression des parties supérieures, se tasse sur les cartilages qui joignent les vertèbres entre elles, d'où résulte un raccourcissement temporaire de la colonne vertébrale et de la taille.

40. C'est au tassement de la terre battue qu'on doit la possibilité de substituer aux sols mouvants, des fonds artificiels d'une solidité à toute épreuve. C'est ce qu'on réalise dans le système des pilotis. Si l'on enfonce dans un sol de tenue médiocre un pilier d'une certaine longueur, il pénétrera la terre de plus en plus, mais avec un progrès décroissant à mesure qu'il s'enfoncera sous le choc qui le pousse; en se tassant devant lui, la terre deviendra de plus en plus résistante, et il arrivera un moment où elle refusera de céder. Si la force appliquée au pilot est d'une énergie considérable, celui-ci sera établi avec toute la solidité possible. Pour former un sol artificiel qui puisse servir de base à de lourdes constructions, on enfonce ainsi dans la terre un grand nombre de pilots en les frappant longtemps avec le *mouton;* la chute répétée de cette pesante masse de fer les enfonce et les établit à tel point, qu'au bout d'un certain temps il reste absolument sans effet sur eux. C'est alors qu'ils peuvent résister aux plus fortes pressions sans aucun danger pour les constructions qui sont destinées à les surmonter. Lorsqu'un pilot est enfoncé à *refus de mouton*, la machine pesant 300 kilogrammes et tombant de $1^m,33$, le pilot peut supporter une pression de 380

Pilotis.

mille kil. Cette manière de jeter sur un sol peu résistant les fondements d'un édifice, est une conquête précieuse de l'homme sur le caprice des terrains : sans lui les édifices seraient toujours exposés à subir des altérations plus ou moins graves, et souvent même la construction en serait impraticable.

Sculpture sur bois.

41. La compressibilité du bois donne lieu à un mode de sculpture en relief très-simple et très-employée dans la tabletterie. Sur la surface bien lisse d'un morceau de bois dur, tel que le chêne et le buis, on applique et l'on presse fortement un poinçon métallique présentant en relief le dessin que l'on veut reproduire. Puis on rabote le bois jusqu'au niveau de la partie comprimée, qui était d'abord en creux; de sorte qu'il ne reste ni creux ni saillie sur la surface; seulement une partie des molécules du bois est dans un état de tassement particulier, résultant de la pression du poinçon. Puis on verse à la surface du morceau ainsi nivelé, une certaine quantité d'eau bouillante, qui pénètre le bois. L'absorption de cette eau a pour effet de détruire celui qu'a produit le poinçon : les molécules comprimées se débandent pour revenir à leur état primitif; et comme aucune n'a été enlevée, tandis que le rabot a supprimé une couche de bois autour d'elles, elles apparaissent en saillie, et présentent un relief tout à fait semblable à la matrice métallique. C'est surtout aux tabatières en buis sculpté que s'applique cette méthode.

42. Pour ce qui concerne l'élasticité des corps, les gaz sont les seuls qu'on puisse considérer comme parfaitement élastiques. Parmi les solides, il en est un certain nombre qui, sans posséder une élasticité absolue, manifestent cette propriété à un degré remarquable. Tels sont, dans le règne minéral, l'ivoire, le marbre, le verre, la plupart des métaux, et surtout l'acier plus ou moins trempé. C'est avec cette dernière substance qu'on fabrique des ressorts de divers genres, et particulièrement les ressorts de montre, dont l'élasticité est parfaite. Si l'on fixe d'une manière stable l'une des extrémités de ces hélices, et qu'en faisant tourner le barillet auquel l'autre extrémité est assujettie, on enroule autour de l'axe les diverses spires, jusqu'à ce que la tension de la chaîne s'oppose à une révolution ultérieure, le ressort, dont toutes les parties sont dans un état forcé, se débandera en faisant tourner le barillet autour de l'axe. Le mouvement du barillet entraînera une chaîne qui s'enroule autour de lui, mais en faisant tourner dans son mouvement la fusée de la montre qu'elle enveloppe, et qui communique le mouvement aux autres pièces de la machine. Ressorts.

Tout le monde connaît les ressorts de voiture, formés de plusieurs lames d'acier assujetties ensemble, mais dont les longueurs vont en décroissant. L'épaisseur de toutes les lames réunies est nécessaire au milieu du ressort, parce que c'est en ce point que porte l'effort de la voiture; mais vers les extrémités le ressort doit s'amincir, afin

d'être suffisamment flexible. On connaît aussi les ressorts en boudin dont on garnit l'intérieur des coussins de fauteuil, et celui des souches d'églises; ces derniers servent à appuyer de petites bougies contre l'anneau que traverse la mèche, de sorte que la flamme est toujours à la même hauteur.

43. Les ressorts sont employés d'une manière utile et commode pour l'évaluation des forces de tout genre, et alors ils prennent le nom de *dynamomètres*.

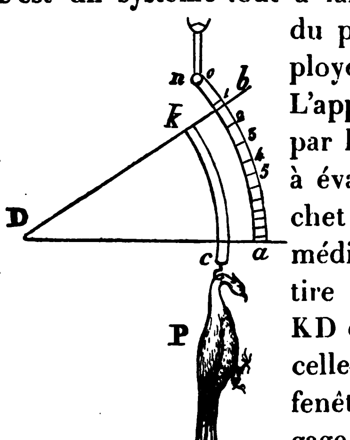
Dynamomètres.

Le dynamomètre de Régnier se compose d'un ressort d'acier de forme ovoïde, dont les deux longues branches peuvent être rapprochées par la pression exercée d'une manière quelconque. Le mouvement de la branche inférieure pousse une pièce *adg*, qui est un levier coudé, lequel fait mouvoir une aiguille contre laquelle il s'appuie, et la promène sur l'arc divisé *mn*. Quand l'appareil est au repos, l'aiguille est au zéro de l'arc; à mesure que les branches du ressort se rapprochent, l'aiguille avance davantage, et lorsque la pression cesse, cette aiguille reste au point qu'elle avait atteint; ce qui rend l'effet produit facile à reconnaître.

On conçoit que cet instrument donne la mesure d'une force quelconque, comparée à une force connue, par exemple, à la pression d'un kilogramme; car on peut, en plaçant verticalement le plan du ressort, le presser par des poids suc-

cessifs de 1, 2, 3,... 100... kilogrammes, et marquer les positions correspondantes de l'aiguille. Cela posé, veut-on connaître l'effort exercé par les bras d'un homme, par un coup de son poing, par un cheval tirant une charrette,... etc.,... il sera facile de disposer ces efforts de manière à ce qu'ils s'appliquent à l'instrument, en en rapprochant les lames; et la position que prendra l'aiguille indiquera en kilogrammes la mesure de l'effort exercé. Du reste, il ne faut pas confondre la puissance instantanée d'une force ou d'une machine, avec son *effet utile*, dont nous avons donné la mesure au n° 38.

Ce dynamomètre peut servir de balance, et c'est un système tout à fait semblable que celui du peson à ressort si employé dans les cuisines. L'appareil étant suspendu par l'anneau *d*, et le poids à évaluer étant fixé au crochet *c*, celui-ci, par l'intermédiaire de la pièce *c*K, tire la branche supérieure KD du ressort à coude; et celle-ci, qui est percée d'une fenêtre dans laquelle s'engage l'arc gradué *a b n*, descendant le long de cet arc à proportion du poids qui la tire, se tient en équilibre contre un des numéros de l'arc *a b*. Ce numéro indique le poids du fardeau P. La graduation en kilogrammes de Pesons.



l'arc *an* a été faite par l'application successive en *c*, de 1, 2, 3...15...30...kil., qui ont amené la branche *b*D en divers points de l'arc *ab*, où les chiffres correspondants ont été inscrits. Cet appareil et quelques autres analogues offrent des balances d'un emploi commode et rapide; mais la sensibilité en est plus que médiocre : on ne peut les appliquer qu'à des masses assez considérables, et elles ne répondent guère que du demi-kilogramme.

Balance de torsion.

44. L'élasticité des fils métalliques est une force qui résiste aux torsions qu'on leur fait subir; c'est sur cette réaction élastique qu'est fondée la balance dite de *torsion*, ou balance de *Coulomb*, si employée dans la mesure des forces électriques et magnétiques.

Un fil de cuivre suspendu verticalement et fixé par son extrémité supérieure, porte par son autre extrémité un levier horizontal ou aiguille de la matière qu'on veut soumettre à l'expérience. Lorsqu'on présente à l'extrémité de celle-ci le corps, ou en général l'action qui doit l'influencer, elle subit une attraction ou une répulsion en vertu de laquelle le fil se tord dans le sens horizontal : l'aiguille décrit donc un certain angle d'autant plus grand que l'action qu'on éprouve est plus énergique; et l'expérience, comme la théorie, prouve que l'effort est proportionnel à l'angle de torsion. Une fois l'aiguille en mouvement, elle devrait, en vertu de l'inertie, continuer et répéter

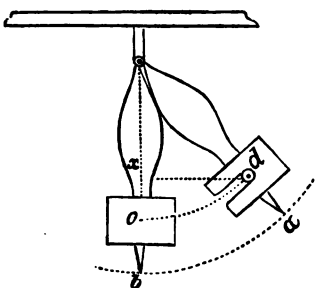
des circonférences sans fin; mais à mesure que le fil se tord, son élasticité réagit de *plus en plus*, et il vient un moment où sa réaction se trouve égale à la puissance qui le tord: c'est alors que l'aiguille s'arrête, parce qu'elle est tenue en équilibre par deux forces égales. On conçoit donc comment l'angle d'équilibre peut donner la mesure de la force éprouvée. La balance de torsion est donc un dynamomètre fondé sur le même principe que les précédents; seulement, il est d'une très-grande délicatesse, et cède à des forces très-petites; on peut même y remplacer le fil métallique par des fils de soie sans torsion, qui en augmentent encore la sensibilité. Coulomb en a tiré un grand parti pour mesurer et comparer les réactions électriques des divers points de la surface d'un corps électrisé, et les magnétismes relatifs des divers points d'une aiguille. C'est aussi par son moyen qu'il a établi les lois importantes des attractions et répulsions électriques et magnétiques, dont les intensités sont, comme on sait, réciproques aux carrés des distances. Le fil qui fait la partie essentielle de ce précieux instrument est suspendu dans l'axe d'un cylindre de verre, fermé à sa partie supérieure par une vis micrométrique, et l'aiguille horizontale tourne dans une large cage aussi de verre, sur laquelle est collée une bande de papier circulaire divisée en 360°, pour la mesure des angles de torsion.

45. Parmi les corps solides, il n'en est aucun peut-être qui soit doué d'une parfaite élasticité, et il

n'en est aucun peut-être qui en soit entièrement dépourvu. Le plus ou moins d'élasticité influe sur le mouvement résultant du choc des corps entre eux. Voyons quelques applications de ce mouvement.

Choc des corps. Supposons les corps sans élasticité aucune; et soient respectivement m, v, m', v', les masses et vitesses des deux corps qui se choquent. Les quantités de mouvement sont mv, $m'v'$; et quand le choquant heurte celui qui va moins vite que lui, il lui communique quelque chose de sa vitesse, dont il perd une portion équivalente, jusqu'à complète égalité de vitesse entre les deux corps. Soit V la vitesse commune résultante; la quantité de mouvement sera $(m+m')$ V, et comme on admet que, dans le partage, la quantité de mouvement se conserve, on a l'équation : $(m+m')\,V=mv+m'v'$... d'où $V=\frac{mv+m'v'}{m+m'}$.

Pendule balistique. On applique cette formule à la détermination de la vitesse des boulets lancés par les bouches à feu. Pour cela, on place la bouche du canon contre un appareil composé d'une lourde masse de bois cerclée de fer, et suspendue par un axe horizontal, autour duquel elle peut tourner comme un pendule autour de son point de suspension; aussi a-t-elle reçu le nom de *pendule balistique*. Le boulet se loge dans le bois, en soulevant la masse qu'il a pénétrée; celle-ci s'avance d'une certaine quantité en décrivant un arc *od*, dont l'amplitude est déterminée par une aiguille qui s'engage dans de la cire molle. Par l'arc on connaît le



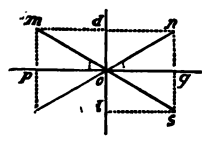
sinus verse ox, qui est la hauteur à laquelle le centre de gravité est élevé; on a donc h dans la formule $v^2 = 2gh$, ce qui donne v, ou la vitesse commune du boulet et de la masse pendulaire, qui sont deux quantités connues. Soit le boulet $m = 12$ kil., v sa vitesse inconnue, $m' =$ 468 kil., masse du pendule, $h = 5^m$, d'où $v = 10^m$; d'ailleurs $v' = 0$, puisque le pendule est d'abord en repos. La formule devient $10 = \frac{12v}{480}$, d'où $v =$ 400. La vitesse initiale du boulet est donc de 400 mètres par seconde. On peut la déterminer de la même manière, à une distance donnée de la bouche à feu. Cette vitesse dépend de la charge, qui a d'ailleurs une certaine limite. La plus grande vitesse obtenue en ce genre, et la plus grande aussi que l'homme ait pu produire jusqu'ici, est 737 mètres.

46. Supposons maintenant les corps élastiques, et admettons d'abord qu'un corps dur frappe perpendiculairement contre un plan doué d'élasticité. L'effet consistera en ce que la surface élastique cédera et se comprimera sous le choc, en usant le mouvement qui la comprime, et il viendra un moment où, celui-ci étant usé, la surface élastique réagira sans obstacle contre le corps choquant; et comme sa compression est tout juste l'effet du choc, son débandement produira en

sens contraire un effort égal à la compression, égal au choc, par conséquent. Donc, elle repoussera le mobile avec une force égale à celle dont il était animé. Si le mobile et la surface sont tous deux élastiques, le même effet sera produit; seulement chacun des deux corps contribuera à l'effet.

Loi de la réflexion.

Cela posé, soit un mobile m frappant en o contre un plan; soit $mo = os$ la vitesse d'impulsion.



La force os se décomposera en ot et oq respectivement égales à mp, md. La normale ot sera détruite par la résistance du plan, et restituée en sens contraire par l'élasticité, d'où $od = ot = mp$. Or, od se combinant avec oq, il en résultera la diagonale $on = os = om$; d'où visiblement trois parallélogrammes égaux; d'où les angles en o aussi égaux. De là le principe de *l'égalité de l'angle de réflexion à celui d'incidence.*

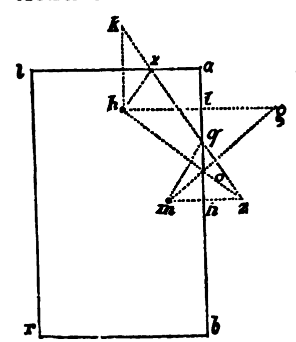
C'est ainsi qu'on voit les balles élastiques rebondir obliquement sur le sol, en décrivant une série de paraboles décroissantes. Les boulets rejaillissent sur la terre en la sillonnant, et passent en se relevant au-dessus des remparts des places assiégées : le tir est dirigé de telle sorte, que le boulet, ricochant, enfile les lignes de soldats le long des courtines. Les ricochets communs qu'on produit en lançant obliquement sur l'eau des pierres plates, sont fondés sur le même principe. La

Ricochets.

force oblique mo, ou oq a une composante verticale op, qui sera d'autant plus petite que le jet est plus obli-

que : or, si celui-ci est rapide, et que les colonnes d'eau n'aient pas le temps de céder en s'écartant devant la pierre, l'eau formera un obstacle sur lequel cette pierre pourra rejaillir; mais il est évident qu'il faudra que la composante verticale soit très-faible, pour que son action, d'ailleurs rapide, soit incapable de diviser l'eau. De sorte qu'il faut une grande obliquité; car telle est la condition d'une très-faible composante verticale. L'effet sera favorisé d'ailleurs par une large surface plate; le mobile rencontrant l'eau par son tranchant, la diviserait avec trop de facilité. Lorsqu'il remonte, il décrit une parabole, et retombe sous le même angle; le même effet doit donc se reproduire, et il se reproduirait indéfiniment, sans la perte continuelle de mouvement que chaque choc fait subir au projectile.

47. Ces principes trouvent une application remarquable au jeu de billard. Les billes rejaillissent contre les bandes, et le principe de l'égalité des angles d'incidence et de réflexion permet de toucher par bande des billes qu'on ne saurait atteindre directement.



Soit *h* la bille à choquer, *m* la bille choquante. Si l'on veut toucher par une bande, on abaissera la perpendiculaire *ht*, qu'on prolongera au dehors d'une quantité égale *tg*; puis menant la ligne *mg*, on aura une intersection avec la bande en un Chocs au jeu de billard.

point *o*, qui est celui vers lequel on doit diriger la bille *m*. En effet, les deux triangles *oth*, *otg* sont égaux, comme étant rectangles en *t*, et ayant *to* commun, et $th = tg$; donc les angles *got*, *hot* sont égaux; mais $mon = got$ comme opposé par le sommet; donc $mon = hot$; donc, à cause de l'égalité des angles de réflexion et d'incidence, si *mon* est l'angle d'incidence, *hot* sera l'angle de réflexion; ou, en d'autres termes, si le point *o* est touché par la bille *m*, celle-ci, en rejaillissant, suivra la direction *oh*, et frappera la bille *h*.

Veut-on toucher sur deux bandes, on abaissera sur les deux bandes contiguës des perpendiculaires prolongées comme ci-dessus, *h*K, *mz*, et l'on joindra les extrémités K, *z*. Cette ligne coupera la première bande en *q*, qui sera le point à viser. On a ainsi deux systèmes de triangles sur lesquels on fera le même raisonnement que plus haut, et on reconnaîtra qu'après la seconde réflexion la bille choquante devra suivre la ligne *xh*.

Il n'y a jamais nécessité à toucher par trois bandes, car on reconnaît que cela reviendrait à toucher par une seule; de même le choc par quatre bandes revient à un choc par deux. Toutefois, il existe pour une, deux, trois et quatre bandes, des formules analytiques que nous ne donnerons pas ici, parce que, outre leur inutilité pratique, leur théorie sort du degré de simplicité que nous avons voulu donner à cet ouvrage.

Les constructions ci-dessus peuvent s'exécuter sans trop de difficulté au moyen de queues placées

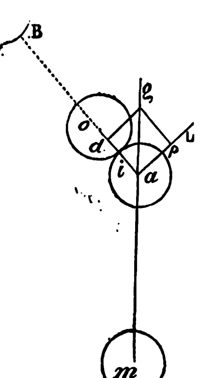
convenablement, et dont les extrémités saillantes figurent les points K, *z*. On peut aussi placer sur les bandes de petits miroirs verticaux, et viser à l'image; car on sait par les principes de l'optique que l'image est, comme les points *g*, *z*, K, symétrique de l'objet qui la peint dans le miroir. Enfin, il ne faut pas oublier que l'élasticité et la direction rectiligne des bandes n'étant point parfaites, le mouvement théorique en est modifié. Toutefois, cette altération est compensée en général par l'épaisseur des billes, qui, n'étant pas de simples points, peuvent dévier quelque peu des lignes à suivre, et néanmoins se rencontrer par leurs épaisseurs.

48. Lorsque deux billes se rencontrent sur le tapis, il résulte du choc deux mouvements différents : l'un que prend la bille choquante, l'autre imprimé à la bille choquée. Or, on peut toujours, d'après les principes suivants, faire suivre à l'une des deux billes, après le choc, une direction voulue; par conséquent, ou pousser l'une dans la blouse, ou caramboler avec l'autre sur une bille donnée de position.

Si l'on frappe une bille élastique en repos avec une autre bille semblable en mouvement, et que le choc se fasse par la ligne des centres, la bille choquée devra prendre le mouvement de la choquante, et celle-ci s'arrêter net. En effet, la bille choquante élastique rencontrant une bille égale en repos, doit lui donner la moitié de sa vitesse; et alors il y a une vitesse commune, comme nous

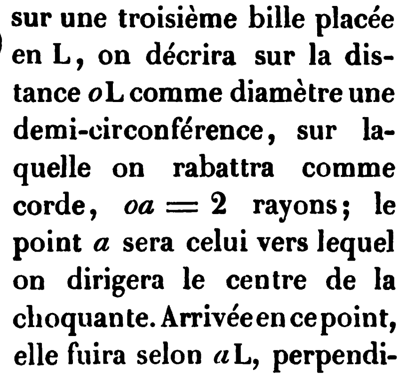
avons vu plus haut dans le cas des corps durs. Mais la bille choquée étant élastique, restitue à la choquante l'effort qu'elle en a éprouvé, et qui est égal à la demi-vitesse primitive de celle-ci; donc la choquante, qui marche avec une vitesse $\frac{1}{2}$, et qui subit une réaction aussi égale à $\frac{1}{2}$ en *sens contraire*, sera évidemment mise à l'état de repos. Quant à la choquée, elle est poussée de plus par la réaction élastique de la choquante, et il est facile de voir qu'elle acquiert un mouvement double; ce qui revient au mouvement total de la choquante.

Cela posé, soit une bille *m* poussée contre une autre bille *o* qu'elle va frapper. Au moment du choc, il y a contact des deux sphères. Soit *ag* la mesure de l'impulsion à cet instant, et décomposons cette force suivant *ao*, ligne des centres, et *ap*, perpendiculaire à cette ligne. La force *ao* agissant dans la direction des centres, est dans le cas ci-dessus, c'est-à-dire que la bille choquante *a* doit s'arrêter, en donnant tout son mouvement à la bille *o*, suivant la direction *ao*, et avec l'intensité *ad*. La bille *o* marchera donc; mais la bille choquante est maintenant animée par la seule composante *ap*, c'est dans cette direction qu'elle marchera à son tour. Ainsi les deux billes devront toujours suivre deux routes perpendiculaires entre elles.

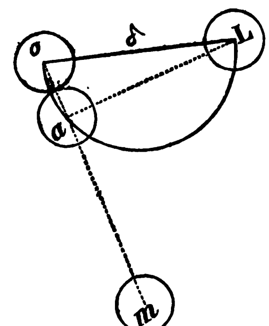


Veut-on envoyer la bille *o* dans une blouse, par celle-ci et le centre *o* on mènera une droite B*o*, que l'on prolongera d'une quantité *oa* double du diamètre des billes, et l'on dirigera vers le point *a* le centre de la choquante. Il est évident que ce centre étant arrivé en *a*, la choquante sera tangente au point *i*; et comme c'est selon la ligne des centres que la choquée est toujours poussée, celle-ci ira nécessairement en B dans la blouse.

Veut-on, au contraire, envoyer la choquante dans une direction donnée *a*L, pour caramboler sur une troisième bille placée en L, on décrira sur la distance *o*L comme diamètre une demi-circonférence, sur laquelle on rabattra comme corde, $oa = 2$ rayons; le point *a* sera celui vers lequel on dirigera le centre de la choquante. Arrivée en ce point, elle fuira selon *a*L, perpendiculaire à la ligne de tangence, puisque l'angle *oa*L est droit, comme inscrit dans une demi-circonférence.



Il est à remarquer que cette construction est encore praticable quand l'angle *mo*L est un angle droit, et le carambolage est théoriquement exécutable sous un angle aigu. Car la construction et la décomposition peuvent se faire tant que la ligne d'impulsion *ma* ne se confond pas avec la ligne



des centres *mo*. Dans ce cas, la décomposition cesse d'être possible; et en appelant φ l'angle *mo*L, on a $\cos\varphi = \frac{ao}{oL} = \frac{2r}{\delta}$. Tel est l'angle aigu limite du carambolage. L'angle obtus limite a lieu quand la bille choquante va heurter la carambolée en rasant l'intermédiaire. Or, dans ce cas, appelant φ, φ' les deux angles en *o*, on a... $\cos\varphi = \frac{2r}{\delta}$... $\cos\varphi' = \frac{2r}{\delta'}$... $\sin\varphi = \frac{2r}{d}$... $\sin\varphi' = \frac{2r}{d'}$... d'où $\cos(\varphi+\varphi') = \cos moL = \cos\varphi\cos\varphi' - \sin\varphi\sin\varphi' = \frac{4r^2}{\delta\delta'} - \frac{4r^2}{dd'} = 4r^2\left(\frac{d'-\delta\delta'}{d\delta d'\delta'}\right)$. Telle est la détermination théorique de l'angle obtus limite.

Les deux premières constructions, qui suffisent au but du jeu, quoique théoriquement très-simples, ne sont pas néanmoins d'une pratique commode. Mais elles indiquent les points de vue auxquels il faut se placer, et guident le coup d'œil de l'opérateur.

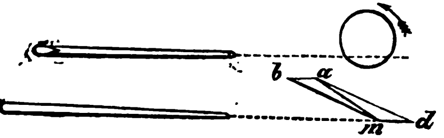
En fait, il est certain que jamais on ne carambole à angle droit, et surtout sous un angle aigu, si ce n'est par l'effet du retour de la bille, dont nous dirons un mot tout à l'heure. Il est également certain que les routes suivies par la choquée et la choquante ne sont pas perpendiculaires entre elles, mais forment toujours un angle aigu. Ces altérations des principes de la théorie résultent

de l'imparfaite élasticité des billes; car, à défaut d'élasticité absolue, la bille choquante ne devient pas immobile dans la direction de la bille choquée; il reste là une portion de la force choquante qui se combine avec la composante perpendiculaire; d'où une résultante comprise entre ces deux-là; donc alors les directions des deux mouvements composent un angle aigu. Ce qui fait comprendre en même temps pourquoi même le carambolage à angle droit ne s'exécute pas, sans l'artifice du retour de la bille.

Si l'ivoire était rigoureusement élastique, la vitesse d'impulsion serait sans influence aucune sur les directions des mouvements après le choc. Mais comme aucune des deux composantes n'est tout à fait annulée, la partie de la composante impulsive qui survivra au choc étant d'autant plus grande que l'impulsion sera plus intense, la résultante définitive variera avec elle en grandeur et en direction.

49. Lorsque la queue ne frappe pas la bille dans la direction du centre, elle produit deux sortes de mouvements : l'un de translation, l'autre de rotation. Dans le cas contraire, la rotation est nécessairement produite par le simple frottement de la bille sur le tapis. Or, cette rotation de la bille modifie nécessairement les effets signalés jusqu'ici. Supposons qu'on ait frappé vivement la bille *au-dessous* du centre, et qu'elle aille heurter une bille immobile. Son mouvement de translation étant détruit par ce choc, il restera le mou-

vement de rotation, dont la direction est telle qu'il devra la ramener en arrière, comme cela est facile à reconnaître. Si le mouvement de translation n'est pas entièrement usé, et qu'il reste dans ce sens-là une



petite composante *md*, la composante rotative étant représentée par *mb*, on aura encore une résultante *ma*, dont la direction pourra être telle que le mouvement se fasse vers la queue. C'est ainsi qu'on produit le retour de la bille, et qu'on peut exécuter le carambolage en arrière.

Mouvement réfracté.

50. Lorsqu'un corps choqué par un mobile est perméable à la matière qui le heurte, le mouvement continue dans son intérieur, mais il subit une modification dans sa direction et sa vitesse; c'est ce que l'on appelle le mouvement *réfracté*.

Supposons une balle lancée contre la surface d'une masse d'eau, et soit *oq* sa vitesse. Si le liquide n'opposait aucune résistance, le mouvement primitif *mo* continuerait en ligne droite suivant *oq*. Décomposons cette force en *op* et *ob*. L'eau opposant une certaine résistance au choc, la composante verticale *op* subit une diminution et devient *on*, par exemple, sans que la composante horizontale soit modifiée; il en résultera une diagonale *os*, différente de *oq*, moindre que celle-ci et plus rapprochée de la surface de l'eau. Il suit de là que toutes les fois qu'on

vise un objet sous l'eau, si l'on dirige sur lui le projectile en ligne droite, on court risque de ne pas l'atteindre, puisque le mobile se relèvera au-dessus de sa direction rectiligne. Il faut donc viser *au-dessous* de l'objet; et cela est d'autant plus nécessaire que, par suite d'une modification analogue que la lumière subit, mais en sens inverse, les objets vus obliquement sous l'eau paraissent relevés *au-dessus* de leur position réelle.

51. Nous terminerons ce chapitre en rappelant quelques faits singuliers qu'on observe dans les cas de chocs très-rapides. Les parties choquées le sont quelquefois avec tant de violence, qu'elles sont emportées par le projectile avant que le mouvement qui leur est imprimé ait eu le temps de se communiquer à la masse.

Effets des chocs très-rapides.

C'est ainsi qu'une balle de fusil tiré à bout portant, traverse une vitre, où elle fait un trou rond sans casser autrement cette vitre. La balle traverse de la même manière une porte ouverte, sans la faire mouvoir sur ses gonds. Si on lance une bombe à laquelle est attaché un long câble, comme on a essayé de le faire pour procurer aux navires compromis près de la côte un moyen de sauvetage, le câble se brise, parce que la bombe marche trop vite pour que son mouvement puisse se communiquer immédiatement au rouleau de corde. Si l'on prend une baguette assez grosse et bien unie, dont on affile les deux bouts, et qu'on la fasse poser par ces bouts sur les bords de deux verres, un coup de bâton frappé sur le milieu de

la baguette la rompra immédiatement sans ébranler les verres.

Si l'on prend un bocal de verre à fond de parchemin et qu'on le remplisse d'eau à moitié, puis qu'on tire dans l'axe du bocal un coup de pistolet, la balle ne frappera que le milieu du fond de parchemin, et cependant le bocal se réduira en miettes, mais seulement dans la partie que touche l'eau; il restera une couronne de verre non entamée, savoir celle qui s'élevait au-dessus du niveau du liquide. Cela tient à ce que la balle, en traversant l'eau, a refoulé le liquide tout autour d'elle contre les parois du vase avec une excessive rapidité, et ne lui a pas laissé le temps de remonter au-dessus de son niveau.

On fait une expérience qui rentre dans celle-là, et qui est plus curieuse encore. Tout le monde connaît les *larmes bataviques*, qu'on obtient en laissant tomber dans l'eau des gouttes de verre en fusion. Ces gouttes de verre trempé prennent une figure pyriforme avec une queue très-longue et très-effilée. On sait aussi que lorsque, tenant une de ces larmes à la main, on vient à briser l'extrémité de la queue, la larme tout entière se réduit en poudre instantanément dans la main de l'opérateur. Or, si, tenant une de ces larmes plongée dans l'eau du bocal dont il vient d'être question, on casse à l'extérieur l'extrémité de la queue, le bocal se brise comme dans le cas précédent. L'explication de ce fait rentre dans la même théorie. Par la réduction instantanée de la larme

en poudre, il y a changement rapide de volume, et par conséquent aussi déplacement rapide de l'eau du bocal. Or, soit qu'il y ait expansion du liquide à l'intérieur par augmentation du volume de la larme passant à l'état de poudre, soit qu'il y ait réduction et par conséquent vide produit, il y a choc rapide contre le verre : dans le premier cas, c'est l'eau qui est poussée directement par l'expansion du volume ; dans le second, elle l'est par l'introduction instantanée de l'air qui se précipite dans le vide.

Quant au singulier mode de rupture des larmes bataviques elles-mêmes, on l'explique en disant que, par l'immersion dans l'eau froide, la surface du verre en fusion se solidifie avant d'avoir pris la position à laquelle elle se réduirait par le refroidissement lent ; de sorte que les molécules sous-jacentes qui se solidifient à sa suite, sont dans un état forcé que détermine et maintient l'état des molécules superficielles. La brisure de la queue détruit l'équilibre général, et chaque molécule intérieure revient à l'état et à la position qu'elle devrait occuper naturellement ; ce qui détruit le lien de cohésion passagère qui les tenait unies, et les met toutes dans l'état de liberté et d'indépendance qu'elles possédaient au moment de la trempe.

CHAPITRE VI.

FORCES MOLÉCULAIRES. — AFFINITÉ. — PHÉNOMÈNES CAPILLAIRES. — FROTTEMENT. — CORDES.

52. L'affinité physique, ou la force moléculaire qui rapproche, sans les faire entrer en combinaison, les atomes des corps, produit une forme déterminée dans les petites masses homogènes qui ne sont pas influencées par l'affinité supérieure de quelque autre corps en contact avec eux. C'est elle qui détermine la forme sphérique des gouttes de pluie et de rosée; elle qui produit ces globules de mercure qu'on voit courir partout quand on divise par le choc une couche de mercure étroite et peu épaisse; c'est elle qui dissémine en gouttelettes l'eau répandue sur un sol pulvérulent.

Cohésion globulaire.

En passant rapidement de l'état liquide à l'état solide, les globules conservent en général leur forme sphérique. C'est ce qui arrive aux parcelles d'acier que le choc d'un caillou détache du briquet, et à l'extrémité d'un fil de métal qu'on fait brûler dans l'oxygène. Lorsqu'on fait fondre dans un creuset une certaine quantité d'antimoine, et qu'on verse de quelque hauteur la masse fondue sur le pavé, elle rejaillit en une infinité de petites boules de un à deux millimètres de dia-

mètre, qui se figent instantanément dans l'air et forment de la grenaille d'antimoine. Enfin, c'est sur cette propriété que se fonde le procédé qu'on emploie pour fabriquer la grenaille de plomb : après avoir fondu le métal en masse, dans un local très-élevé, au sommet d'une tour, par exemple, on le verse dans une sorte de passoire, à travers les trous de laquelle il s'échappe par petites masses qui, au sortir de là, prennent la forme sphérique. Elles conservent cette forme pendant toute la durée de leur chute; car alors aucun corps n'étant en contact avec elles, elles se trouvent abandonnées à leur propre cohésion. Puis elles rencontrent une masse d'eau froide dans laquelle elles pénètrent, et où elles achèvent de se figer.

53. L'affinité de l'eau pour la matière des vases qui la renferment détermine son écoulement à l'extérieur, le long des parois de ces vases, ce qui est souvent fort incommode. Or, on peut combattre cet inconvénient de l'affinité par l'affinité elle-même. Pour cela on applique le bord du vase qui contient l'eau qu'on veut verser, contre un objet déjà mouillé, une cuiller par exemple, placée dans le vase qui doit recevoir le liquide; celui-ci s'écoule le long de cet objet auxiliaire au lieu de suivre les parois du vase duquel on le verse. On peut même, par ce moyen, et en lui appliquant un tube, remplir un vase « à long col et d'étroite embouchure. »

54. On profite de l'affinité mutuelle de beau- Affinité.

coup de corps hétérogènes, comme on met également à profit le défaut d'affinité réciproque de plusieurs autres. Les colles de tous genres sont une application précieuse de l'affinité réciproque : les soudures sont une colle métallique, souvent indispensable pour relier entre eux les métaux. On scelle le fer dans la pierre au moyen du plomb et du soufre. L'affinité qui s'exerce entre les substances auxiliaires et celles entre lesquelles elles servent de lien, est souvent supérieure à la cohésion même du corps principal : la porcelaine raccommodée au moyen de certains ciments, casse ailleurs que sur la ligne où se trouve appliquée la colle; le papier, la toile même, se déchirent autour de la cire à cacheter qui en rattache les bords, sans que celle-ci cède sous les surfaces de contact.

Lithographie. 55. Au contraire, le défaut d'affinité de l'eau, par exemple, pour les substances grasses et résineuses permet de tenir à l'abri de ce liquide les corps qu'on veut soustraire à son action. On vernit, on peint à l'huile le bois et la pierre, qui, de cette façon, deviennent imperméables à l'eau. Certains savons produisent le même effet sur la toile. C'est sur le défaut d'affinité de l'eau et des substances grasses qu'est fondé l'art de la lithographie. Le dessinateur trace ses figures sur une pierre lisse à grain fin au moyen d'un crayon gras, dont les traits sont enlevés par le papier lorsqu'on en applique une feuille à la pierre. Il faut donc, après chaque épreuve, renouveler la couche de

crayon, qui est enlevée en grande partie sur son épaisseur. Pour y parvenir, on commence par mouiller la pierre avec de l'eau; cette eau ne s'attache pas aux traces grasses, mais seulement aux parties découvertes de la pierre. Alors on passe sur celle-ci un rouleau de peau enduit de la matière grasse du crayon. Cette matière s'attache par cohésion naturelle aux traces du dessin qui n'ont pas été mouillées, mais elle ne touche pas, pour ainsi dire, au reste de la pierre, à cause de la couche d'eau dont celle-ci est recouverte, et qui repousse la matière grasse. Les choses se passent donc comme si, la pierre étant neuve, le crayon s'y appliquait pour la première fois; et le rouleau recommence à chaque épreuve l'œuvre du dessinateur. Ainsi cet art si important repose tout entier sur un simple fait de cohésion d'une part, et de l'autre un défaut d'affinité de l'eau pour les matières grasses.

56. C'est aussi un fait d'affinité physique que l'adhésion des gaz à la surface des solides, et surtout leur accumulation singulière dans les corps poreux, notamment la pierre ponce et le charbon. Un volume de charbon de bois absorbe jusqu'à 90 volumes de gaz ammoniac; car les gaz ne sont pas combinés, puisqu'on les expulse sans altération par la chaleur, ou au moyen de l'eau quand ils sont peu solubles. On profite de cette propriété pour faire absorber par le charbon des vapeurs d'une nature fâcheuse ou désagréable : quelques litres enlèvent en très-peu de

Absorption des gaz.

temps l'odeur du tabac, dont des fumeurs imprègnent si profondément les chambres qu'ils habitent.

Le sucre absorbe beaucoup d'air dans ses pores, et cet air est un obstacle à la pénétration de l'eau dans le sucre et à la dissolution de celui-ci. Lorsqu'on met un morceau de sucre dans un verre d'eau, on voit monter à la surface une foule de bulles, qui sont l'air chassé par la pénétration du liquide dans les pores du sucre ; mais la pression des colonnes d'eau qui tendent à entrer fait obstacle à la sortie de ces bulles : d'où il résulte que l'expulsion de celles-ci, et par suite la dissolution du morceau de sucre, seront d'autant plus tardives que le poids des colonnes sera plus considérable. On conçoit, d'après cela, pourquoi le sucre fond plus facilement dans une petite quantité d'eau que dans une grande. Ou bien, pour le faire fondre plus vite dans un verre déjà rempli d'eau, il faut le tenir à la partie supérieure, près de la surface. On trouve dans ce procédé cet autre avantage, que l'eau, à mesure qu'elle dissout le sucre, devenant plus dense, se précipite au fond du vase pour faire continuellement place à de l'eau non sucrée; ce qui hâte évidemment la dissolution totale.

Absorption par les pores des solides.

57. Les phénomènes de capillarité sont une des plus remarquables applications de l'affinité réciproque des liquides et des solides. Outre les nombreux exemples que nous en offre la nature, nous les rencontrons à chaque pas, pour ainsi dire,

dans les faits de la vie commune. C'est sur la capillarité que se fonde l'usage des chandelles, des bougies, des mèches de lampes : l'huile, le suif et la cire fondue montent entre les filets des mèches comme entre des tubes. L'usage de la poudre d'écriture et de tous les absorbants analogues, est fondé sur le même principe. On peut même employer de la petite grenaille de plomb pour dégarnir d'encre les plumes : les globules de métal se mouillent aux dépens de la plume, et leur poids les retenant, ils gardent le liquide quand on retire la plume.

C'est par un effet de capillarité que les substances grasses tombant sur une étoffe en petite quantité, non-seulement imprègnent la partie de l'étoffe qu'ils touchent, mais envahissent de proche en proche, et finissent par former une large tache. Or, c'est aussi par la capillarité qu'on peut combattre cet effet. Pour cela, on chauffe assez fortement l'étoffe sous la tache au moyen d'un corps métallique, d'une cuiller d'argent par exemple, qu'on a remplie de charbons rouges, et l'on produit d'abord ainsi la liquéfaction de la substance grasse. Alors on applique sur la tache quelque corps en poudre, de la craie par exemple, ou une feuille de papier non collé. Le liquide gras est absorbé partiellement; et, en répétant cette opération un certain nombre de fois, on finit par faire disparaître la tache. Ici la poudre minérale et le papier agissent précisément comme ils le font lorsqu'on les applique à une page d'écri-

ture fraîche, où ils *boivent* le superflu de l'encre.

Gélivité. 58. L'imbibition des corps poreux par les liquides offre un moyen simple et sûr de reconnaître la qualité de certains matériaux de construction. Toutes les pierres exposées à l'humidité s'en pénètrent plus ou moins, et il en est quelques-unes qui en absorbent tant que dans les froids de l'hiver, l'eau gèle à leur intérieur; or, les petits glaçons en se formant brisent les cellules qui les contiennent, de sorte que la pierre se délite et tombe en poussière. Il est donc de la plus haute importance de ne pas employer dans les constructions des pierres aussi altérables, qu'on appelle *pierres gélives*. Or, on s'assure d'avance de leur qualité, en en plaçant des fragments pendant 24 heures dans une dissolution saturée et bouillante de sulfate de soude qui les imbibe profondément, puis les exposant à l'air, au soleil et au froid. L'évaporation de l'eau fait cristalliser dans leurs pores le sulfate de soude, qui doit produire le même effet que la congélation de l'humidité. Si donc les pierres résistent parfaitement à cette épreuve, on pourra les employer en toute assurance; on les rejettera au contraire, pour peu que cette expérience leur ait fait subir quelque altération.

Conservation des bois. 59. C'est à la capillarité qu'est due l'ascension de la séve dans les végétaux; et l'expérience prouve que le bois vert exerce sur ce liquide organique une force ascensionnelle plus grande qu'il ne le ferait à l'état sec. On a profité de ce fait pour faire absorber au bois des liquides différents, dans le but

de combiner avec lui des principes qui le rendent inaltérable aux agents météoriques. On coupe un arbre en séve, et on plonge sa base dans un bain d'une dissolution de pyrolignite de fer. Ce liquide monte abondamment dans tous les vaisseaux du bois, et, par la dessiccation, il reste combiné avec la fibre ligneuse à l'état solide. Alors le bois est imputrescible et inattaquable par les insectes. Ce procédé industriel, appliqué fort en grand par M. Boucherie, est une découverte précieuse dont tous nos arts de construction doivent tirer un grand parti. Nous devons dire que le même physicien a reconnu qu'on pouvait imprégner les bois d'une manière plus commode, plus rapide et plus complète que par la capillarité ascensionnelle. Pour cela, on applique au sommet de la souche un sac de peau sans fond qui contient la solution de pyrolignite; poussé par son seul poids, le liquide pénètre entre les fibres verticales de l'arbre, et se filtre rapidement dans toute sa longueur, en laissant toutefois dans les canaux qu'il traverse assez de sel pour produire la combinaison voulue.

60. L'action moléculaire s'exerce entre les particules homogènes ou hétérogènes par le fait seul du contact apparent, ou plutôt par la réduction des distances à une quantité extrêmement petite et inappréciable à nos sens. Si donc on amène, par un moyen artificiel, des fragments d'un même corps ou même de deux corps différents à se toucher de très-près par quelques points, il pourra y avoir Frottement.

6.

cohésion entre ces fragments. C'est ce qu'on réalise en appliquant l'une contre l'autre deux demiballes de plomb coupées de manière à offrir des surfaces bien planes. Or, c'est à ce genre de phénomènes qu'il faut rapporter ceux dus à la force qu'on désigne par le mot de *frottement.*

Attribuer le frottement à l'enchevêtrement réciproque des aspérités que présentent les surfaces des corps, c'est donner aux faits une interprétation qu'ils repoussent manifestement dans la plupart des cas. Que cette cause agisse parfois concurremment avec l'action moléculaire, c'est ce qui n'est pas douteux; mais il est une foule de circonstances où l'on ne saurait l'invoquer. Les nœuds par lesquels on joint deux fils se composent de surfaces dont les aspérités n'offrent pas de résistance : ils ne se tiennent que par l'effet du frottement; et celui-ci offre une puissance souvent supérieure à la cohésion du fil, puisque, par la traction, celui-ci se brise ailleurs qu'au nœud, et que celui-ci ne se résout pas; ce qui s'explique par un plus grand rapprochement des molécules du fil entre les surfaces nodales. Un verre de cristal uni est, malgré son poids, retenu entre les doigts par le frottement; or, le poids de ce verre briserait des fils incomparablement plus rigides que les aspérités de la peau: c'est donc un pur effet de cohésion moléculaire.

Ses avantages.

61. Quoi qu'il en soit, le frottement, soit simple, comme dans ce dernier cas, soit complexe, eu égard au concours de l'action des aspérités, trouve une foule d'applications dans la nature, dans les

arts, dans les circonstances de la vie commune: c'est une des forces les plus générales, tantôt nuisible aux efforts de l'homme, tantôt, au contraire, favorisant ses efforts et exerçant le plus souvent une action bienfaisante.

D'abord c'est à elle que nous devons l'équilibre ordinaire de la station et de la marche. En toute rigueur, jamais nous n'appuyons sur des surfaces telles que la direction de la pesanteur soit normale à ces surfaces; l'action oblique se décompose donc en deux parties : l'une normale, l'autre parallèle ; et celle-là nous ferait perpétuellement glisser et tomber, si elle n'était élidée par le frottement de nos pieds contre la surface d'appui.

C'est au frottement que nous devons de pouvoir tenir à la main, et par simple contact, une foule d'objets de toutes tailles et de toutes sortes de surfaces.

C'est le frottement qui fixe et retient les clous, les épingles, les chevilles de tous nos meubles, les bouchons de nos bouteilles, les liens de tous genres, et jusqu'à nos vêtements.

C'est par le frottement de cordes et de courroies contre des jantes plates ou dans les gorges des poulies, que l'on produit le mouvement de rotation dans une foule de machines. Le rouet de la fileuse, la meule du rémouleur, le tour du tabletier, les cylindres des presses à vapeur, sont mis en mouvement par ce moyen.

Le frein des voitures publiques est une application très-simple et très-utile de la force du frot-

tement. Dans les pentes, la voiture est entraînée au bas par sa pesanteur décomposée parallèlement à l'inclinaison, et les roues n'offrent, par leur frottement contre le sol, qu'une résistance insuffisante. Or, on augmente cette résistance en appliquant et serrant contre la garniture des jantes une pièce dont le mouvement est réglé par une manivelle. Le genre de mouvement des roues qui tournent sur un axe au lieu de traîner, ne les fait frotter que faiblement contre le sol, tandis qu'elles sont obligées de frotter, de traîner, pour ainsi dire, sur la longue surface du frein. Dans certains cas, on arrête la rotation des roues, et la voiture les traîne en les appuyant contre le sol par une partie fixe de leur surface.

Ses inconvénients.

62. Parmi les pièces à charge contre le frottement, on signale d'abord la perte de force qu'il fait subir aux machines. Cette perte est essentiellement très-variable, puisqu'elle dépend du nombre et de l'état des surfaces des pièces frottantes; on l'évalue toutefois, en gros, aux $\frac{3}{5}$ de la force du moteur. On l'atténue au moyen de corps gras ou de plombagine en poudre dont on enduit les surfaces : par ce moyen, les aspérités des corps, et les cavités surtout, sont comblées; et l'on substitue à une substance une autre substance douée d'une faible action cohésive.

63. Un second cas, qui rentre jusqu'à un certain point dans le précédent, consiste dans la résistance que la traction des corps éprouve par leur frottement contre le sol. On atténue d'abord cette

résistance en substituant au frottement du premier genre le frottement du second; ainsi, au lieu de traîner directement un bloc de pierre sur le pavé, on l'établit sur des rouleaux qu'on pousse avec des leviers. Les roues des voitures sont un système analogue; mais quoique la rotation progressive autour d'un axe donne une résistance comparativement faible, le frottement des roues contre le sol et autour de l'essieu détruit encore, en assez grande partie, l'effort du moteur. On sait combien, sur les routes ordinaires, la traction est difficile pour les chevaux. Sur un pavé de mauvaise qualité, le mouvement imprimé par le cheval est continuellement détruit par la chute de la roue entre les saillies de deux pavés; chaque pas du cheval est le produit d'un nouvel effort qui recommence le mouvement. A force égale dans le moteur, les effets sont extrêmement différents, selon la nature des surfaces de la chaussée. Dans des essais comparatifs faits par le comte de Rumford, il a trouvé que les tirages nécessaires sur différentes sortes de routes étaient représentés moyennement de la manière suivante :

Sur un pavé ordinaire	29
Sur une chaussée d'empierrement . . .	41
Sur une route sablonneuse	62
— *id.* très-sablonneuse	95
— *id.* de sable fin	125
Sur des cailloux nouvellement posés .	135

64. Pour détruire l'effet nuisible du frottement sur les routes, il faut en rapprocher la surface au-

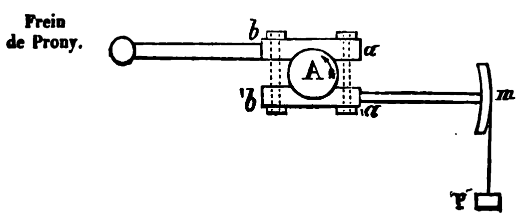
tant que possible de l'état poli. Les routes empierrées, ou *macadamisées*, comme on dit, offrent des surfaces assez commodes, après quelque temps d'usage; mais on peut les amener immédiatement à cet état au moyen du rouleau compresseur de Schatenmann, qui offre de plus l'avantage de leur donner une très-grande solidité. Les traîneaux courent avec une extrême rapidité sur les routes glacées des régions polaires, et l'on sait avec quelle vitesse les patineurs sillonnent la glace. Mais ce qu'on a imaginé de plus remarquable en ce genre, ce sont les routes artificielles qu'on appelle *chemins de fer*.

Rails-ways. Un pareil chemin se compose, comme on sait, d'ornières saillantes, formées par des barres de fer posées bout à bout sur deux lignes parallèles, et sur lesquelles des roues s'engagent par des demi-gorges creusées dans leurs jantes, de telle sorte que le système du véhicule ne peut sortir des rails par les côtés. Le rail et le bord de la roue s'appliquent l'un contre l'autre par des surfaces lisses, ce qui diminue le frottement de telle sorte qu'on évalue celui-ci au 10e ou au 12e de ce qu'il est sur les routes ordinaires. On évalue aussi la puissance nécessaire à la traction au 200e de la charge verticale. Ainsi, une force indiquée par le dynamomètre comme équivalant à 30 kilogrammes, peut traîner sur un chemin de fer 6,000 kilogrammes. On sait que, grâce à la puissance des machines locomotives, les convois des rails-roads traînent les hommes par milliers.

Si le frottement est atténué considérablement sur les voies de fer, il n'est cependant pas nul; et non-seulement il n'est pas possible de le réduire à une valeur excessivement petite, mais même c'est grâce à lui que les locomotives fonctionnent. Si les roues ne rencontraient pas dans le frottement contre le rail une résistance suffisante qui leur fait appui, elles tourneraient autour de leur axe sans donner à la voiture le moindre mouvement de progression. C'est donc grâce au frottement que ces machines marchent, mais c'est grâce aussi à l'affaiblissement de cette force qu'elles entraînent les convois avec une si grande vitesse. On avait longtemps douté que le frottement entre des surfaces de fer aussi lisses pût offrir aux roues un appui suffisant, et l'on avait imaginé des tractions au moyen de cordes s'enroulant d'espace en espace autour de tambours fixes, ou même des rails et des roues à crémaillère; mais l'expérience a prouvé que le frottement seul contre le rail poli donnait un appui suffisant, pourvu que la locomotive fût très-lourde. Cette dernière condition toutefois offre de très-graves inconvénients, auxquels on a essayé de remédier de diverses manières. La plus remarquable et la plus avantageuse assurément est le système proposé par M. de Jouffroy. Il consiste en deux rails ordinaires polis, et un rail intermédiaire en fonte *striée*, sur lequel pose la roue motrice, ainsi douée d'un frottement suffisant, tandis que les roues de la locomotive et de tous les wagons portent sur les rails polis.

Outre le frottement contre les rails, qui, surtout si l'on considère tout l'ensemble du train, donne lieu à une certaine déperdition de mouvement, il y aura encore la résistance de l'air qui produit quelque déchet; et, néanmoins, il reste encore assez de force pour traîner un lourd convoi avec une vitesse de 8 à 10 lieues à l'heure. On sait à quels accidents sont sujettes ces redoutables machines. Lorsque, par une cause quelconque, les locomotives se trouvent subitement arrêtées, le train, lancé par elles de toute leur vitesse, va heurter contre le corps des machines ou contre les obstacles qui se présentent de côté par le fait du déraillement : de là, dislocation et rupture des diverses parties de ce train. On a proposé aussi une foule de moyens et d'appareils pour prévenir ces désastres; nous ne citerons, pour nous tenir au sujet qui nous occupe, que celui qui consisterait à serrer instantanément de puissants freins contre les roues de toutes les voitures. Dans l'état de traction, les lames élastiques seraient séparées des roues; et quand l'action locomotrice cesserait par une cause quelconque, elles s'appliqueraient contre les jantes spontanément, et parce que tel serait leur état d'équilibre.

Frein de Prony.



65. La force du frottement est encore employée d'une façon singulière dans un appareil connu

sous le nom de *frein de Prony*, et qui a pour but de mesurer la puissance réelle des machines. Les mâchoires ab, $a'b'$ sont serrées par des vis à écrou contre l'arbre de couche c qui tourne horizontalement; les barres doivent aussi rester horizontales. Quand elles sont égales en poids, comme elles tendent à tourner en sens contraires, on conçoit qu'elles se fassent équilibre; mais si l'on charge l'une d'elles d'un poids p, elle tend à entraîner tout le système dans le sens mp; mais le frottement de l'arbre, qui tourne en sens contraire, frottement qui s'exerce contre les surfaces des deux mâchoires, détruit cette tendance, et maintient horizontale la position des barres. La puissance de la machine sera d'autant plus considérable que le frottement de l'arbre contre les mâchoires le sera davantage; ou, ce qui revient au même, que ce frottement équilibrera un poids p plus considérable, pressant à l'extrémité du levier Am. D'un autre côté, elle est évidemment proportionnelle à la vitesse de rotation qu'elle imprime à l'arbre, ou, ce qui revient au même, inverse du temps d'une révolution, donné par un certain nombre n de tours dans un temps t. La force à mesurer est donc directement proportionnelle, 1° au poids p soutenu; 2° à la circonférence que ce poids tend à décrire dans le temps t, circonférence qui a pour rayon $Am = l$, et pour expression $2\pi l$; 3° au nombre n de tours fait dans un temps donné. Mais elle est inverse de la durée de ce temps; donc elle aura pour expression : $\varphi = \frac{2\pi l p n}{t}$. Soit,

par exemple, $Am = 2^m,5 \ldots p = 60$ kil.... $n =$ $20 \ldots t = 50'' \ldots$ il vient $\varphi = 365$ kilogrammes.

Résistance des cordes. 66. Il faut citer les cordes à propos de la force du frottement, dont elles offrent une application très-digne de remarque. Une corde, ainsi qu'un fil quelconque, se compose de torons appliqués par la simple torsion commune les uns contre les autres. Ces cordelettes se composent elles-mêmes de fils formés de fragments de lin et de chanvre pris à l'état de filasse, et réunis les uns aux autres par la torsion que leur donnent les diverses machines rotatives. Or, en dernière analyse, un câble se compose de brins souvent très-courts de filaments végétaux, qui ne font corps ensemble que parce qu'ils sont tordus plus ou moins; or, il est manifeste que c'est le seul frottement de ces brins les uns contre les autres qui les maintient en cet état, et oppose à leur séparation la résistance la plus énergique.

Toutefois, la torsion des fils élémentaires qui composent une corde est un principe d'affaiblissement : composée de cent fils tordus ensemble, elle est moins forte que si ces cent fils égaux étaient tendus parallèlement. Cela tient à ce que la torsion communique aux fils une première tension qui les affaiblit; et, en second lieu, la torsion ne pouvant être absolument égale entre tous, il y en a nécessairement un certain nombre qui, étant mal tendus, ne supportent que peu ou point de l'effort qui tire la corde: celui-ci se répartit donc sur un moindre nombre. Du reste, ce résultat est

indépendant de la matière qui compose la corde.

C'est pour cela que les câbles de fer verticaux qui soutiennent le tablier des ponts suspendus sont formés de fils non tordus, mais assemblés parallèlement et serrés par d'autres fils en travers. On fait beaucoup de câbles en fils de fer tordus, lesquels sont appliqués à d'autres usages; ici, on ne peut s'exposer à perdre quelque chose de la force de ces fils lorsqu'ils doivent supporter un poids si considérable, qui pèse sur eux d'une manière permanente.

67. Une corde ne saurait être tendue horizontalement en ligne droite; car en admettant qu'elle pût l'être dans le cas où elle serait dépourvue de pesanteur, il est clair que, dans la réalité, le poids de ses diverses parties la tirera comme le ferait un doigt appliqué en travers. La corde s'infléchira donc par l'effet de la pesanteur, et prendra la forme d'une courbe concave connue sous le nom de *chaînette*. C'est cette forme qu'on observe sur la corde d'un cerf-volant, et sur les câbles qui soutiennent les mâts des vaisseaux, ou les grues dans les constructions. Les cordes de fil de fer qui joignent les culées des ponts suspendus ont la forme de chaînettes; or, il est facile de reconnaître qu'une traction considérable s'exerce aux deux extrémités dans le sens tangentiel, de sorte que si les cordes étaient fixées au sommet des culées, elles tendraient au renversement de ces masses. Mais les cordons passent au-dessus, puis redescendent plus loin sous le sol, où ils vont se Chaînette.

perdre dans de solides massifs de maçonnerie.

68. Nous devons rappeler ici que, malgré les meilleures garanties que puisse offrir un pont suspendu, sa solidité est toujours compromise dans le cas que voici. La marche d'un homme sur un semblable pont lui imprime toujours une secousse, une sorte de mouvement de balançoire qui, isolément, est sans aucun danger. Mais qu'on suppose un bataillon d'infanterie traversant le pont *au pas*, cette forme de la marche pourra amener la rupture, et paraît l'avoir fait en quelques cas. Cela vient de ce que les secousses produites par le *pas*, étant toutes semblables et concordantes, s'ajoutent entre elles, et donnent un effort égal à leur somme, résultante qui pourra surpasser la ténacité des jointures. La même chose n'aurait pas lieu, si le même nombre d'hommes ou un nombre plus grand encore y passait d'une façon irrégulière, parce qu'ils donneraient lieu à une foule de mouvements discords qui se détruisant mutuellement, du moins en partie, ne produiraient en somme qu'une résultante beaucoup plus faible.

69. La roideur des cordes est un obstacle qui réduit dans bien des cas l'utilité de leur emploi, puisqu'une partie de la force motrice est employée à vaincre cette roideur. On fait évanouir en grande partie cette difficulté, en substituant aux cordes des courroies plates qui sont beaucoup plus flexibles, et qui ont l'avantage de toucher les roues et les gorges des poulies par de plus gran-

des surfaces; ce qui est utile quand c'est le frottement des cordes qui détermine la rotation.

Cordes mouillées.

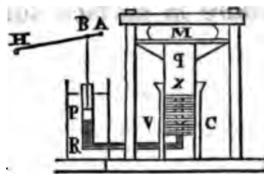
70. Les fils gagnent en force lorsqu'ils sont mouillés; les cordes au contraire deviennent plus faibles dans la même condition; mais en tous cas, les uns et les autres se raccourcissent, ce qui provient sans doute de l'augmentation en diamètre par l'interposition de l'eau. De là une application dont l'utilité est constatée par une anecdote connue. Lorsque l'obélisque de la place Saint-Pierre de Rome était sur le point d'atteindre son piédestal, les câbles qui le tenaient suspendu se trouvèrent un peu trop longs sans qu'il fût possible de manœuvrer davantage les machines, pour remédier à cet accident non prévu. Une voix sortie de la foule cria : « Mouillez les cordes. » On déféra sur-le-champ à cette sorte d'oracle, et les câbles se trouvèrent suffisamment raccourcis pour que la base du monolithe pût atteindre la surface sur laquelle elle devait reposer.

CHAPITRE VII.

HYDROSTATIQUE. — PRESSION DES LIQUIDES EN TOUS SENS. — LOI DU NIVEAU. — POUSSÉE LATÉRALE ET VERTICALE.

71. L'incompressibilité des liquides, et de l'eau en particulier, a pour conséquence immédiate la transmission, sur tous les points de la surface d'un vase, de la pression exercée en un seul point de cette surface et sur une seule molécule du liquide. Ce principe trouve une application remarquable dans la puissante machine connue sous le nom de *presse hydraulique*.

resse aulique. Dans un corps de pompe CV joue un assez large piston q qui, lorsqu'il est poussé de bas en haut, appuie la résistance à vaincre contre une traverse fixée à deux montants très-solides. Le piston est poussé dans ce sens par l'eau renfermée au-dessous de lui dans le corps de pompe, et communiquant par un canal avec un corps de pompe beaucoup plus petit dans lequel joue le piston P; au moyen d'un levier ABH, la puissance pousse celui-ci, et refoule l'eau dans le canal et dans le principal corps de pompe CV. C'est par cette impulsion que l'eau qui pénètre en X soulève le grand piston q, et presse la masse M. L'ex-



périence prouve que la pression se transmet sur toutes les parties du grand piston, et cela est facile à comprendre *à priori*. On admet d'abord aisément que la pression du petit piston dans le petit corps de pompe se transmette au grand piston, contre une surface égale, ainsi que l'indiquent les lignes ponctuées. Or, si la pression n'était pas dans toute l'étendue de la masse d'eau ce qu'elle est en x, les molécules pressées en x ne pourraient être maintenues par les forces ambiantes, qui sont supposées moindres, et fuiraient selon la direction de moindre résistance. Puisqu'il n'en est rien, et qu'on se place dans l'hypothèse de l'équilibre, il en résulte que la pression est essentiellement la même partout; donc, il y a sur toute la surface du grand piston autant de pressions égales à celle qu'exerce le petit piston, que la surface de celui-ci est contenue dans la surface du grand. Supposons au premier 3 centimètres, au second 18 centimètres de diamètre; les surfaces seront entre elles comme 9:324, ou comme 1 : 36. La pression appliquée au petit piston étant de 30 kil., par exemple, la surface du grand supportera 36 pressions de 30, ou une charge de 1080 kil. Si, de plus, comme cela a toujours lieu, la puissance agit par un levier considérable, qui soit 12 par exemple, eu égard à celui du petit piston, l'effet précédent sera encore multiplié par 12; il sera donc 12960 kil. Tel est, dans les conditions données, l'effort qu'exercerait le bras d'un homme ordinaire; mais on fait des presses qui produisent

des efforts beaucoup plus considérables que celui-là. Il est aisé de reconnaître qu'en appelant respectivement q et p les sections du grand et du petit piston, L et l les bras de levier AH, AB, de la puissance et du petit piston, enfin m l'effort de la puissance appliquée en H, on a pour formule de l'action de la presse hydraulique.... $\varphi = \frac{mqL}{pl}$. A quoi il convient d'ajouter le poids d'une colonne d'eau, ayant pour base la surface du grand piston, et pour hauteur la différence de niveau entre cette surface et la position inférieure du petit piston, ainsi qu'on le prouve dans la théorie du paradoxe hydrostatique.

On arrive au même résultat, en appliquant ici la considération des vitesses respectives de la puissance et de la résistance que nous avons indiquée au n° 29, comme le moyen le plus simple de mesurer l'effet des machines. Donnons à la surface du petit piston 1 centimètre carré, à celle du grand 40 centimètres. Si le premier pousse devant lui une certaine quantité d'eau, celle-ci va former sous le grand une couche de liquide dont la hauteur sera inverse de sa base : elle n'aura, par exemple, qu'un quarantième de la hauteur du cylindre d'eau que le petit piston a poussé devant lui, sa base étant 40 fois plus considérable; car ce n'est évidemment qu'à cette condition que les volumes d'eau seront les mêmes. Donc la vitesse du grand piston, ou, ce qui revient au même, celle de la résistance, ne sera qu'un quarantième de celle de la puissance qui agirait immédiatement

sur le petit piston ; celle-ci est donc immédiatement multipliée par 40, ce qui est précisément le rapport $\frac{g}{p}$ des surfaces. D'ailleurs, l'effet des leviers se calcule de la même manière ; on retombe donc sur la formule ci-dessus.

Dans cette machine, comme dans toutes les autres, il y a un déchet considérable dû aux frottements et aux réactions des diverses parties de l'appareil. Quant à celles-ci, elles supportent des pressions énormes, puisque tous les points de la paroi du grand corps de pompe subissent la même pression que ceux de la surface du grand piston. Aussi la machine fatigue-t-elle beaucoup; ce qui amène le besoin de réparations fréquentes.

On emploie la presse hydraulique, dans une foule de cas, pour réduire les corps à un moindre volume; on l'applique aussi spécialement à la mesure des tenacités et des résistances qu'offrent les vases, et spécialement les chaudières des machines à vapeur. La presse hydraulique du port militaire de Cherbourg sert à essayer la résistance des ancres, sur lesquelles elle agit par traction horizontale; elle brise souvent des jas de fer forgé de deux décimètres carrés de section; sa puissance est de 300 mille kilogrammes.

Les chaudières des machines à vapeur ne sont admises à l'exercice qu'autant qu'elles supportent une pression hydraulique quintuple de la force élastique de la vapeur sous laquelle elles doivent travailler. Ordinairement on évalue ces pressions

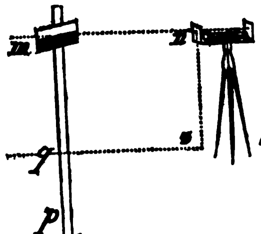
en *atmosphères*. Pour savoir combien la puissance d'une presse hydraulique contient de ces unités, on divise cette puissance évaluée en kilogrammes par le nombre de centimètres carrés que contient la surface du grand piston, et on multiplie le quotient par 1,04, valeur d'une atmosphère, c'est-à-dire, du poids moyen d'une colonne atmosphérique sur un centimètre carré. La raison de ce calcul est manifeste. On trouve ainsi que, dans l'exemple ci-dessus, la pression hydraulique est d'environ 39 atmosphères.

72. La loi du *niveau*, soit d'une même surface, soit des tubes communiquants, dont les colonnes d'eau ont leurs sommets dans un même plan horizontal, trouve son application dans plusieurs instruments destinés à reconnaître et à produire l'horizontalité.

Niveau à bulle.

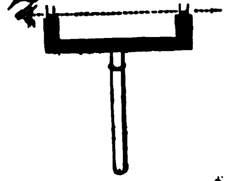
Le *niveau à bulle d'air* est un petit tube de cristal sensiblement cylindrique, presque rempli de liquide; la partie que le liquide n'atteint pas est occupée par un peu d'air. Si l'on place l'axe du cylindre dans une situation parfaitement horizontale, la bulle d'air qui surmonte toujours le liquide, en vertu de sa légèreté relative, ne se portera vers aucune des extrémités du cylindre, puisque aucune des deux n'est relevée; d'où il suit qu'elle devra s'étendre selon l'une des arêtes du cylindre, et tel sera le caractère d'horizontalité de l'axe de l'instrument. Mais on trouve préférable de courber un peu le cylindre; et alors, dans le cas où la plaque métallique qui le porte

aurait ses faces horizontales, le milieu du tube en serait la partie la plus élevée, et celle par conséquent où devrait se porter la bulle d'air. On reconnaît donc que les faces de cette plaque sont horizontales, lorsque la bulle occupe cette position moyenne, comme le montre la figure, et que son milieu coïncide avec le milieu du tube; ce que l'on reconnaît, parce qu'alors ses extrémités sont comprises entre deux fils ou traits transversaux marqués sur le tube. On peut donc, en plaçant sur une pierre taillée en assise, ou sur la table d'un meuble, un niveau à bulle d'air, porté lui-même sur une plaque de cuivre à faces bien parallèles, reconnaître si les surfaces vérifiées sont ou non horizontales, et quand elles ne le sont pas, les y amener par des essais successifs. On se sert aussi du niveau à bulle pour exécuter les opérations géodésiques qu'on appelle le *nivellement*, et qui consistent à déterminer quelle est la différence de hauteur ou de niveau entre deux points donnés, c'est-à-dire la différence de leurs distances au centre de la terre. Cette opération est indispensable pour savoir, par exemple, dans quel sens se ferait l'écoulement des eaux; et si l'on peut conduire une source d'un de ces points vers l'autre, pour construire une route entre les deux, et en calculer la pente...etc. Dans ce cas, l'instrument est porté sur un pied de graphomètre et pourvu d'une lunette dont il sert à rendre l'axe optique horizontal. Celui-ci est dirigé sur une mire placée à distance. Soit *m* le point vu, point auquel on



fixe par signaux, la ligne transversale de la planchette mobile. La différence de hauteur *pq*, entre *mq* et la hauteur *nz* de l'instrument, sera la différence de niveau des deux stations.

au d'eau. 73. Le *niveau d'eau* est un instrument qui a le même objet que le niveau à bulle, mais qui n'est pas si parfait, et ne sert que pour des nivellements de médiocre étendue, et qui n'ont pas besoin d'une extrême précision. C'est un tube de fer-blanc recourbé

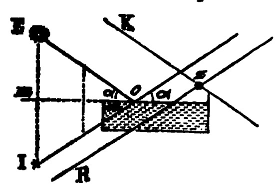


en U, dont les branches verticales se prolongent en tubes de verre sans fond, et qu'on remplit d'un liquide coloré, de manière que celui-ci pénètre dans les prolongements de verre. Sur ceux-ci on a marqué deux traits, que les sommets des colonnes liquides verticales doivent atteindre, quand l'axe de la partie principale du tube est horizontal; et alors, en appliquant l'œil à la surface de l'une des deux colonnes, de manière à ce que l'autre cesse d'être vue et soit le prolongement de la première, le rayon visuel ainsi appuyé se trouve horizontal, et les points des objets visés sur lesquels il se projette sont à même hauteur que lui. Dès ce moment, on rentre dans l'emploi du niveau à bulle d'air et à mire. Toutefois, il n'est pas nécessaire de rendre tout à fait horizontal l'axe de l'instrument, et les traits de niveau sur les tubes ne sont pas indispensables. Les surfaces des deux

colonnes liquides sont nécessairement dans un même plan horizontal, quelle que soit la position des trois parties du tube. Il suffit de faire en sorte que les sommets des deux colonnes soient dans les tubes de verre, pour qu'on puisse les viser.

74. On peut, sans niveau à bulle l'air, s'assurer par un moyen assez simple, si un plan donné est ou non horizontal. Pour cela, on prend un verre à boire qu'on pose sur ce plan et qu'on remplit d'eau jusqu'au bord, du moins à très-peu près. Si le bord du liquide est partout à même distance de celui du verre, il y aura horizontalité ou à peu près; dans le cas contraire, représenté par la figure, on conclura que le plan penche du côté où le bord du verre est le plus éloigné du liquide. Niveau verre.

75. On se sert d'une large nappe de mercure, de niveau dans un vase fixe, pour faire, dans les observatoires, ce qu'on appelle un horizon artificiel. Si l'on veut mesurer la hauteur d'un astre, on se place un peu en avant de la surface de mercure, laquelle fait miroir, et donne une image très-nette de l'astre en question. Comme le rayon réfléchi Horizon artificiel.

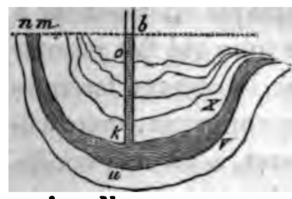


fait avec la surface un angle α, égal à l'angle du rayon incident, et que l'angle α' lui est égal comme opposé par le sommet, il s'ensuit que si, du point o, on vise d'abord l'image I, puis l'objet E, l'angle compris entre ces deux points sera double de l'angle α. En prenant donc la moitié de

cet angle, on aura l'angle de hauteur horizontale demandé, la surface de niveau du mercure remplaçant l'horizon réel. Il est vrai qu'on ne place pas l'instrument de mesure des angles précisément au point *o*, ce qui serait impossible, mais à quelque point *z* en avant, d'où l'on vise l'astre et son image. Mais, vu la distance infinie de ces deux points, les rayons visuels dirigés vers eux du point *z*, sont parallèles à OE et OI; l'angle K*z*R est donc égal à EOI; ce qui remplit le but qu'on se propose.

Puits artésiens. 76. La loi du niveau maintient les liquides à même hauteur dans les tubes communiquants, quelles que soient leur distance et l'inégalité de leurs dimensions. C'est sous cette forme qu'on peut rapporter à cette loi les *puits artésiens* et en général les *jets d'eau.*

Un puits artésien est un tube appliqué à un réservoir en forme de vase et rempli d'eau, tube dans lequel le liquide doit monter à la hauteur où s'élève l'eau dans le réservoir. On admet qu'il existe dans l'intérieur de la terre des masses d'eau provenant d'une cause quelconque, mais ayant probablement pour origine l'infiltration des eaux pluviales par les tranches que présentent à la surface de la terre des couches perméables; ces eaux se rassemblent dans des bassins compris entre deux couches qui sont au contraire imperméables, des couches argileuses, par exemple. Soit la partie *mnuvxk* de la figure, une couche de sable relevée avec plusieurs autres et présentant sa tran-



che en mn, l'eau s'y infiltrera, et l'imbibera à une certaine hauteur, indépendamment des cavités souterraines qu'elle pourra offrir; mais elle ne pourra s'élever partout au niveau mn, si la couche est comprise entre deux couches d'argile. Or, si l'on creuse le sol en o jusqu'en K, et qu'on applique en K un tube indéfini, l'eau devra s'y élever jusqu'au niveau de mn, en b. Si on supprime le tube, elle devra s'élancer jusqu'à cette hauteur, et l'on aura un jet. La hauteur du jet, ou la simple ascension sans jet dans le trou creusé par la sonde, seront déterminées par la différence de niveau entre le point o et le point m, lesquels peuvent être éloignés d'ailleurs de cent lieues ou plus. S'il existe plusieurs couches analogues et attenantes, on conçoit qu'on puisse obtenir, en les traversant successivement, des jets de hauteurs inégales. Tout cela n'est que la très-simple application de la loi de niveau. Nous devons ajouter, toutefois, que le tubage du trou de sonde modifie considérablement la hauteur du jet; ce qui est un simple effet de frottement. Les puits artésiens offrent un sujet d'étude et d'applications des plus intéressants; mais nous n'avions à les signaler ici que comme une des applications de la loi de niveau.

77. La théorie de tous les jets d'eau est au fond la même que celle des puits artésiens : le jet qui s'élance n'est autre chose que la colonne liquide Jets d'eau.

que contiendrait un tube appliqué latéralement à un réservoir. Ce n'est pas le tube qui fait monter cette colonne, il ne fait que la coërcer latéralement, de sorte que si on le supprime, cette colonne se déversera par le haut, mais à la condition de conserver toujours la hauteur du réservoir. Toutefois, le frottement dans les canaux et la résistance considérable de l'air au sommet de la colonne, diminuent très-notablement la hauteur à laquelle s'élèverait théoriquement le jet. Rien n'est plus facile à exécuter qu'un jet d'eau : un vase quelconque avec un robinet retourné et ascendant donne un jet, mais le diamètre et la disposition des tubes jouent un rôle important dans le fonctionnement plus ou moins parfait de ces appareils. On ne peut même établir aucun calcul sur la loi de décroissance donnée par Mariotte. Selon ce physicien, un réservoir de 60 centimètres d'eau ne donnerait que 59 centimètres de jet; pour une hauteur double, la perte serait de 4 centimètres; elle serait de 9 pour une hauteur triple, et en général proportionnelle au carré des hauteurs. Mais l'expérience montre que cette loi est entièrement troublée par l'influence des diamètres et de la disposition des tubes. Nous n'avons pas besoin de dire que le jet droit retombe droit en formant nappe à son sommet, et que les ajutages inclinés donnent des jets inclinés qui, conformément aux lois ordinaires de la chute des corps, prennent une forme parabolique.

78. Les *poussées* latérale et verticale des liquides, qui interviennent à chaque instant dans les théories de l'hydrostatique, donnent lieu à des applications pratiques d'une certaine importance. Poussées latérale et verticale.

Il en résulte d'abord qu'il faut donner une grande résistance aux parois des vases destinés à renfermer des liquides, quand ces vases doivent avoir une hauteur et une largeur assez considérables : parfois les vases crèvent, à défaut de cette précaution. En vertu de cet effort continuel, les douves des tonneaux se desserrent, et les cercles de bois qui les entourent se fatiguent. C'est par là que l'eau entre dans les moindres fissures d'un bateau. Les digues, les enceintes des réservoirs, sont continuellement battues par cette poussée, et il faut leur donner une résistance proportionnée, non à l'étendue de la masse liquide, mais à sa hauteur.

79. La poussée latérale produit le mouvement par réaction. Qu'on imagine un petit chariot cubique plein d'eau et porté sur des roues légères; un trou latéral propre à donner issue à l'eau étant d'abord bouché par de la cire. Au moment où l'on fera fondre celle-ci et où l'eau prendra son écoulement, le petit chariot roulera en sens contraire. Cela vient de ce que la pression latérale agit sur la surface opposée à l'orifice du trou, et n'est pas contre-balancée par une pression contraire, puisque l'eau s'écoule par là. On fait ainsi des tourniquets par réaction. Mais cet effet a été utilisé sérieusement par Bernouilli, qui l'a appliqué à des ba-

teaux dont l'eau était le seul moteur, d'après ce système d'écoulement.

80. Nous citerons pour première application de la poussée verticale, les seaux à soupape de fond, dont on se sert dans les puits étroits et d'une grande profondeur, où l'on aurait de la peine à retourner les seaux pour les emplir. L'eau soulève la soupape, et pénètre dans le seau à la hauteur du niveau extérieur, après quoi la soupape se referme d'elle-même et retient le liquide. C'est de cette manière que l'eau s'élève dans un certain nombre de pompes foulantes.

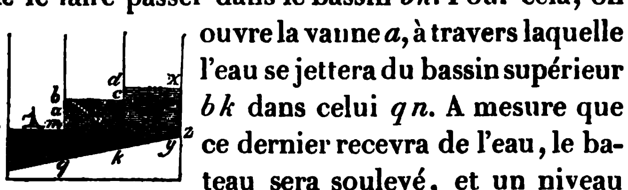
Nous citerons comme seconde application de la poussée, le mode suivant d'extraction des objets lourds tombés au fond d'un fleuve ou de la mer, du moins près des côtes, et avec une médiocre profondeur d'eau.

Soulèvements. Que l'objet à retirer soit, par exemple, un canon. Au moyen d'une plongée, on attachera un câble aux oreilles de la pièce, et ce câble sera attaché par l'autre bout à un bateau qu'on chargera d'abord autant que possible. Lorsque la corde sera bien tendue et arrêtée, on déchargera le bateau travailleur, en transbordant sur un autre qui l'accompagne les briques qui chargeaient le premier. Par l'effet de cet allégement, la poussée verticale soulèvera le bateau, et celui-ci entraînera le canon qui restera suspendu au-dessous de lui. Il sera alors possible de pousser le bateau avec sa charge vers le rivage; et s'il rencontre un fond plus élevé, où le canon se posera, on recommen-

cera là la manœuvre, laquelle, suffisamment répétée, amènera le fardeau assez près du rivage pour qu'on puisse s'en rendre tout à fait maître par les procédés ordinaires de traction. Au lieu de bateaux, on peut se servir de tonneaux à peu près pleins d'eau, qu'on vide après l'amarrage : en en réunissant un nombre considérable, ce qui est assez facile, on pourra produire des efforts de soulèvement très-énergiques.

81. C'est par la poussée verticale qu'on fait monter les bateaux les plus lourds dans les bassins d'écluses, au moyen desquels ils peuvent passer d'un niveau plus bas dans un cours d'eau plus élevé, comme par les marches d'un véritable escalier.

Soit *m* la position du bateau sur l'eau *mn;* il s'agit de le faire passer dans le bassin *bk*. Pour cela, on ouvre la vanne *a*, à travers laquelle l'eau se jettera du bassin supérieur *bk* dans celui *qn*. A mesure que ce dernier recevra de l'eau, le bateau sera soulevé, et un niveau commun finira par s'établir entre les deux bassins. Quand cela aura lieu, on ouvrira la porte d'écluse *bq*, et le bateau passera dans le bassin *bk*, après quoi on refermera la porte. Puis, on ouvrira la vanne *c*, et l'eau se précipitera du bassin *dy*, dans le bassin inférieur *bk*. Le bateau sera soulevé dans celui-ci, et le niveau s'établira. Alors on ouvrira la porte *dk*, et l'on tirera le bateau dans le troisième bassin. En continuant de la sorte, on pourra Écluses.



élever le bateau jusque dans le cours d'eau supérieur, ou jusqu'au point de partage des eaux du canal, et là, il redescendra sur l'autre versant par une manœuvre inverse. C'est de la même manière qu'on rachète les petites chutes d'eau dans les fleuves, et qu'on fait passer les bateaux dans la nappe supérieure de la cascade.

Radeaux souleveurs.

82. Le procédé des bateaux soulevés par la poussée verticale a été employé par les anciens, pour opérer le transport de très-lourdes masses. Ainsi, l'un des obélisques d'Héliopolis a été abattu sur le sol, puis on a creusé depuis le Nil un canal jusque sous le monolithe, et un bateau ou radeau a été engagé dans le canal, en travers de l'obélisque. Ce radeau, chargé d'abord des deux côtés, et appliqué par son milieu à la surface de la pierre, ayant été déchargé du poids qui le faisait enfoncer, s'est trouvé soulevé par la poussée du liquide, et a soulevé en même temps l'obélisque qui se trouvait en croix avec lui. Le radeau a été ramené avec sa charge par le canal et le fleuve jusqu'à la mer, puis transporté à Ostie et à Rome. Il paraît que c'est en général par ce moyen que les vieux habitants de l'Égypte allaient chercher leurs gigantesques obélisques dans les carrières de Syène, et, grâce au débordement du Nil, les transportaient avec assez de facilité sur les divers points où ils les déposaient.

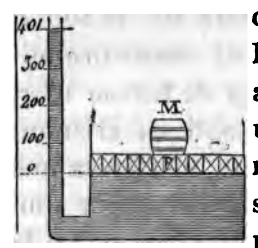
C'est ainsi entre autres qu'Amasis, avant-dernier roi d'Égypte, fit transporter à Saïs une cha-

pelle de granit d'un seul morceau, qui pesait deux millions de kilogrammes.

Nous croyons qu'on pourrait, par ce moyen, transporter jusqu'à des maisons, à de médiocres distances; et véritablement ce n'est qu'une question de frais. Nous ajouterons à ceci, qu'en considérant la chose d'une manière abstraite, on peut, au moyen de la poussée, élever une masse quelconque à une hauteur quelconque. Soit par exemple, le bloc de granit M, reposant sur le sol. Il ne sera pas difficile de construire autour de lui une sorte de bateau vKx, dont le fond sera établi en creusant un peu la terre. Puis, on élèvera une enceinte en maçonnerie mKn, à la hauteur voulue, et l'on y fera arriver autant d'eau qu'on le voudra par un moyen quelconque. A mesure que cette sorte de puits se remplira, le bateau et le bloc s'élèveront en même temps, et finiront par arriver à la hauteur prescrite en $m\,n$. Là, on pourrait déposer le bloc sur une colonne, par exemple, qui serait comprise dans l'enceinte de maçonnerie, ou, en le faisant porter provisoirement sur des poutres qui s'appuieraient sur les murs de l'enceinte convenablement percés, on pourrait exécuter au-dessous telle construction qu'on jugerait convenable, et sur laquelle il porterait définitivement.

83. La pression exercée par les liquides sur le fond d'un vase ne dépend nullement de la capacité de ce vase, mais de sa base et de la hauteur Balance hydraulique.

du liquide, quelque rétréci que puisse être le vase au-dessus de son fond. C'est là ce qu'on appelle le paradoxe hydrostatique : et ce principe singulier trouve une explication très-simple dans la résistance des parois substituée au poids des colonnes liquides tronquées. Or, une application remarquable du paradoxe hydrostatique, consiste à équilibrer d'énormes masses par de très-petites quantités de liquide. Qu'on imagine, en effet, une caisse



dans laquelle se meut un piston P, qui s'y joint exactement, et au bas de laquelle est appliqué un tube qui se replie verticalement, jusqu'à une hauteur assez considérable. Si l'on remplit d'eau le tube et la caisse au-dessous du piston, celui-ci supportera sur sa face inférieure une pression de bas en haut, qui sera la même que si le tube avait partout même largeur que le piston; or, dans ce dernier cas, elle serait le poids d'une colonne d'eau qui aurait pour base celle de ce piston, et pour hauteur celle de l'eau dans le tube à partir de cette base. Si le piston est large, et le tube assez long, ce poids et la pression équivalente seront considérables : avec 1 mètre carré de base, par exemple, et une longueur de tube de 3 mètres, quelque étroit que soit celui-ci, la poussée sur ce piston serait de 3000 kilogrammes; et un verre d'eau de plus versé dans le tube, augmenterait la pression de plusieurs centaines de kilogr. Une masse quel-

conque placée sur le piston, supporterait donc une impulsion considérable, et serait comprimée énergiquement, si elle butait contre un obstacle fixe. Jusqu'ici, nous retrouvons la presse hydraulique, moins le petit piston; l'action de celui-ci est remplacée par le poids de l'eau qui presse contre le grand.

Mais puisque la poussée de l'eau peut être équilibrée par un poids placé sur le piston, on reconnaît que cet appareil peut servir de balance. Il suffira pour cela, après avoir introduit une certaine quantité d'eau, et avoir marqué sur le tube la position du sommet de la colonne quand le piston est à vide, de charger ce piston de 1, 2, 3, 4,... 10... 20... 100... 1000... kilog., ce qui fera enfoncer successivement le piston, et remonter l'eau dans le tube, jusqu'à ce que l'augmentation de poussée résultante compense l'accroissement de poids, puis marquer sur l'échelle du tube les points de niveau correspondants. Cette graduation faite, il est clair qu'une masse qui, imposée au piston, fera monter la colonne d'eau du tube jusqu'au n° 401, produira le même effet qu'ont produit 401 kilog., et que tel sera par conséquent le poids de cette masse.

On reconnaît encore dans cette machine l'application du principe des vitesses inverses des puissances. Elle est très-propre à mesurer le poids de masses considérables, des voitures publiques, par exemple; et à côté de quelques légers inconvénients, qui ne se font guère sentir qu'à l'égard

de poids assez petits, cette *balance hydraulique* offre l'avantage de la plus grande simplicité possible dans sa manœuvre, puisqu'elle n'exige qu'un coup d'œil instanané donné à l'échelle du tube.

Machine à colonne d'eau.

84. On trouve encore une application des mêmes principes dans la machine à épuisement dite *machine à colonne d'eau de Reichenbach*. Un corps de pompe principal P*o* est surmonté d'un tube étroit AB, et une colonne d'eau PB presse sur le grand piston P, comme si elle avait partout la même largeur. Le piston P en pousse un plus petit *p*, jouant dans le corps d'une pompe foulante, à laquelle est adapté le tube *xy*S, dans lequel le piston *p* fait monter l'eau où plonge la pompe foulante. Or, si la surface du piston *p* est, par exemple, le *douzième* de celle de P, il est clair que la colonne *q*S devrait être *douze* fois aussi longue que celle PB pour faire équilibre à la pression de celle-ci. Si donc elle n'a pas cette longueur, il est clair que le piston P poussera *p*, et par suite la colonne *xy*S, qui montera à proportion de ce qui lui manque pour atteindre la hauteur d'équilibre, et pourra s'élever jusqu'au sommet de la mine, hors de laquelle elle déversera. Seulement, il faut faire remonter le piston P, lorsque, par suite de son mouvement, le liquide du tube BA étant entré dans le corps de pompe, cette colonne aura très-notablement baissé; ce qui amènera l'équilibre avec la colonne

contenue dans le tube qS. Pour cela on ferme A et l'on ouvre un orifice o, par lequel il sort un peu de liquide; dès lors la puissance qui presse sur P devient très-facile, et la colonne qS repousse facilement le piston vers A. La communication en ce point étant ouverte, il suffit de remettre dans le tube BA le peu d'eau qu'on en avait ôté, pour produire une ascension semblable à la précédente; et ainsi de suite indéfiniment, tant que le réservoir qx fournira du liquide à la pompe foulante.

CHAPITRE VIII.

ÉQUILIBRE DES SOLIDES PLONGÉS DANS LES LIQUIDES. — DENSITÉS.

85. Tous les corps plongés dans l'eau ou dans tout autre fluide perdent une partie de leur poids égale au poids du volume de fluide déplacé. Ce principe, combiné avec la connaissance des densités des corps, permet de vérifier leur composition dans certains cas, comme le fit Archimède au sujet de la couronne de Hiéron.

Analyse physique des alliages. Supposons, en effet, qu'il s'agisse de vérifier la composition d'un couvert d'argent d'un poids de 220 grammes, et qui doit, d'après les règlements, contenir seulement 11 grammes d'alliage de cuivre. La densité de l'argent étant 10,474, et celle du cuivre 8,788, on doit avoir pour volume de l'argent $\frac{209}{10,474}$ centimètres cubes, et pour celui du cuivre $\frac{11}{8,788}$; ce qui donne respectivement 19^{ccc},954 et 1^{ccc},252, total 21^{ccc},206. Chaque centimètre cube d'eau pure pesant un gramme, il en résulte que le métal à peser perdra dans l'eau 21 grammes 206 milligrammes, si sa composition est celle qu'il doit avoir. Si, au contraire, il perd 23 grammes, par exemple, cela prouvera que l'alliage a un volume de 23 centimètres cubes et est en excès. Pour déterminer les quantités absolues des deux

métaux, on raisonnera de la manière suivante :

Soient x et y les quantités d'argent et de cuivre alliées, exprimées en centimètres cubes. Le centimètre d'argent pesant $10^{gr},474$, celui de cuivre $8^{gr},788$, on aura évidemment : $x + y = 23$ et $10,474\, x + 8,788\, y = 220$; d'où l'on tire par les procédés ordinaires : $x = 10,6026$, $y = 12,3974$. En multipliant ces volumes respectifs par 10,474 et 8,788, on obtient 111 grammes d'argent et 109 grammes de cuivre, de sorte qu'il manque 98 grammes d'argent remplacés par du cuivre en poids égal. Le couvert d'argent n'a donc de valeur réelle que 0,53 de la valeur annoncée. La densité du cuivre n'étant pas très-différente de celle de l'argent, cette vérification ne donnerait pas de résultats bien prononcés si l'alliage extra-légal était peu considérable. Il en serait autrement s'il s'agissait d'un alliage d'or, la densité de ce métal étant beaucoup plus grande que celle du cuivre et de l'argent lui-même. Nous n'avons pas besoin de faire ressortir l'importance de cette application.

86. On peut reconnaître, dans bien des cas, la nature des corps, par la pesée dans l'eau ou dans certains autres liquides.

Ainsi, à la simple vue, on peut confondre le platine avec l'argent, le vermeil ou le cuivre doré avec l'or. Or, la distinction est facile à faire en pesant ces corps dans l'eau, après les avoir pesés dans l'air; car, de la sorte, on trouvera la densité de la matière en expérience; et, la comparant au

chiffre de la table des densités, on reconnaîtra la nature du corps correspondant. L'épreuve est facile, attendu que le platine pèse le double de l'argent; l'or est à peu près dans le même cas, et son poids spécifique est bien plus que double de celui du cuivre.

Si l'on trouve une valeur qui ne correspond pas de très-près aux chiffres des tables, on devra en conclure que la matière en épreuve est un alliage; et en se donnant, d'après les probabilités, les métaux qui entrent dans la combinaison, on en déterminera la proportion comme dans le problème ci-dessus.

Distinction des métaux.

Mais il existe un moyen plus simple encore de distinguer les uns des autres les métaux que nous venons de mentionner. Le platine et l'or sont plus lourds que le mercure, ce qui fait qu'ils vont à fond dans un bain de ce dernier métal; au contraire, l'argent, le cuivre, le plomb même, sont notablement plus légers que le mercure, d'où il résulte qu'ils surnageront dans un bain mercuriel. Si donc on place sur le bain un morceau de métal, et que ce morceau enfonce tout à fait, on en conclura sûrement que c'est du platine; dans le cas contraire, ce serait de l'argent ou du cuivre argenté, si ce n'est quelque autre métal de qualité inférieure. L'or se distinguera de la même manière de tout métal doré; il plonge à fond dans le mercure, comme ferait le platine, tandis que, hors ces deux-là (et le tungstène, qu'on ne rencontre jamais), tous les autres surnagent. A la ri-

gueur, on pourrait se trouver en présence d'un morceau de platine doré ou plaqué d'or, et l'épreuve que nous indiquons serait tout à fait trompeuse. Si ce cas possible est présumé, on recourra à la recherche de la densité, et l'on trouvera un chiffre supérieur à celui de l'or. Toutefois, l'épreuve sera délicate, à cause de la faible différence; au pis aller, on recourrait à la fonte, qui liquéfiera l'or extérieur en laissant le platine à l'état solide.

Il faut faire remarquer, au sujet de ces expériences, que l'or, l'argent et le cuivre, mais surtout le premier de ces métaux, s'altèrent par le contact du mercure; de sorte que, si on les plonge dans le bain, il ne faut les y laisser qu'un instant très-court, ce qui suffit à l'épreuve. De plus, on peut donner à l'objet une très-légère couche de vernis qui n'en change pas sensiblement la densité, et qu'on ôte ensuite avec de l'alcool; il suffira même de mouiller légèrement la pièce avec de l'eau pour laquelle le mercure n'a pas d'affinité. Si, malgré cette précaution, le métal se blanchissait, on le ferait passer au feu, qui chasserait le mercure.

87. La table des densités des corps sert en général à faire connaître le poids d'un corps de forme géométrique et susceptible de mesure. Soit, par exemple, un bloc de marbre blanc de la forme d'un parallélipipède, et dont les trois arêtes sont respectivement $0^{m},62$, $1^{m},13$, $0^{m},57$; le produit géométrique ou volume de ce bloc sera, comme on sait, $0^{mm},39934$. La densité de cette matière

étant indiquée 2,751, d'où 2,751 kilog. pour le poids du mètre cube, on multipliera ces deux nombres, et l'on obtiendra 1098^{k},584, ou environ 1099 kilogrammes pour poids de cette masse.

Pesée des grandes masses.

Si le corps à peser, qui n'est pas d'ailleurs susceptible d'être mis dans une balance, n'a pas une forme géométrique, on l'entourera d'une enceinte en planches de forme régulière, et l'on remplira d'eau cette enceinte, dont le volume sera facile à prendre. La différence de ce volume avec le nombre de litres d'eau qui a rempli l'enceinte donne évidemment le volume de la masse à peser, et l'on aura son poids en multipliant le volume par la densité de la matière.

Réciproquement, on aurait le volume d'un petit corps, de forme très-irrégulière, d'une statuette par exemple, en la plongeant dans un vase cylindrique plein d'eau, et mesurant, après l'avoir retiré, le volume du vide; ou bien en le pesant dans l'air, et divisant son poids par la densité de la matière, d'après la table, on obtiendra son volume.

On se sert aussi, pour apprécier la capacité des corps, du poids de l'eau ou du mercure qu'ils peuvent contenir. Supposons qu'une boule ovoïde creuse de platine contienne 1186 grammes de mercure; sachant que chaque millimètre cube de mercure pèse 0^{gr},0136, on divisera 1186 par 0,0136, et l'on aura 87206 millimètres, ou un peu plus de 87 centimètres cubes.

Mesure des

On se sert d'un moyen analogue pour mesurer

les diamètres des tubes capillaires. On les emplit de mercure par aspiration, et l'on pèse le tube plein de mercure, après l'avoir pesé vide. La différence de poids est le poids du cylindre de mercure. Soit p le poids, l la longueur du tube qu'on peut facilement mesurer, x son diamètre inconnu. Le poids d'un corps étant égal à son volume multiplié par sa densité, on aura cylindre $= v\delta = p$, d'où $v = \frac{p}{\delta} = \frac{p}{13,6}$; d'où $\frac{p}{13,6} = \frac{1}{4}\pi x^2 l$; d'où $x = \sqrt{\frac{4p}{13,6\pi l}}$. Soit, par exemple, $l = 185$ millimètres, $p = 0^{gr},712$, on en tire $x = 0,6$; le diamètre du tube est donc 6 dixièmes de millimètre. Ce procédé de mesure est très-usité en physique. petites capacités.

88. L'inégalité des densités des liquides donne le moyen, quand ils n'ont pas une affinité chimique trop décidée, de les superposer les uns aux autres, ce qui peut être utile dans bien des cas. Ainsi, dans les lampes d'église brûlent des veilleuses dont l'entretien n'exige qu'une médiocre couche d'huile; or, on remplit d'eau les vases sur les trois quarts de la hauteur, et le quatrième quart seulement est occupé par la couche d'huile qui surnage.

On a fait de ce principe une application remarquable dans les lampes dites *hydrostatiques*, ou de *Thilorier*. Une colonne liquide d'une dissolution très-dense de sulfate de zinc tient en équilibre une colonne d'huile beaucoup plus haute qu'elle, et la force de monter jusqu'au sommet du bec. Malgré la combustion de l'huile, la co-

lonne se soutient toujours à cette hauteur par suite d'un mécanisme interne que nous aurons à étudier plus loin.

Superposition des liquides.

Le petit appareil connu sous le nom de *fiole des quatre éléments* est fondé sur ce principe. Dans un tube fermé se trouvent du mercure, du carbonate de potasse liquide, de l'alcool, de l'huile de pétrole et de l'air. Par l'agitation, toutes ces choses se mêlent, et l'on n'a d'abord qu'un tohu bohu dans lequel on ne reconnaît rien; mais peu à peu ce chaos se débrouille, et chaque liquide vient prendre la place que lui assigne sa densité, dans l'ordre que nous avons énoncé ci-dessus.

On sait que le vin se mélange ordinairement avec l'eau; cela vient de leur assez grande affinité mutuelle, combinée avec une très-faible différence de poids spécifique. Mais si l'on verse le vin à la surface de l'eau avec précaution, en le faisant tomber, par exemple, et de très-bas, sur un petit corps flotteur comme une croûte de pain, il ne se mêle pas à l'eau et surnage à la surface; quelquefois même, après être un peu descendu au-dessous, il remonte et se fixe en haut. Le vin est, comme l'indique la table, généralement plus léger que l'eau, mais la différence est faible. Toutefois, il est facile d'augmenter l'effet de cette différence, en faisant lutter l'une contre l'autre, et sans secousse, deux colonnes assez longues d'eau et de vin. Si cette longueur est considérable, il y aura entre les deux

colonnes une plus grande différence de poids absolu, et la poussée de l'eau sera une force plus considérable qui favorisera le phénomène. C'est ce qu'on réalise en plaçant au fond d'une longue éprouvette remplie d'eau une petite fiole pleine de vin, bouchée par une plaque percée d'un trou de 3 à 4 millimètres, ou par un petit bouchon de liége traversé d'un fragment de tuyau de plume. L'appareil étant en parfait repos, on voit le vin monter en mince colonne à la partie supérieure de l'éprouvette, et s'y étendre en couche. Pendant ce temps, l'eau entre dans la fiole pour y remplacer le vin, et y occupe la partie inférieure, comme on le reconnaît à l'œil; au bout de quelques minutes, la fiole ne contient plus que de l'eau légèrement teintée de rose. La résistance qu'éprouvent les gouttes de vin dans leur mouvement ascensionnel, de la part des couches d'eau qu'elles vont heurter, est rendue sensible par la forme rabattue en manière de champignons qu'elles prennent sur toute la longueur de la colonne. On remarque aussi que la colonne de vin n'occupe que la moitié à peine du trou par lequel elle sort, l'autre moitié étant traversée par la colonne d'eau descendante.

Le changement de l'eau en vin, qu'exécutent les escamoteurs des places publiques, n'est autre chose que cette expérience faite dans un vase à double fond, dont l'intérieur contient du vin en quantité assez considérable, pour remplacer une notable quantité d'eau supérieure. On parviendrait

au même résultat, en faisant plonger dans une bouteille remplie de vin, une fiole à col long et étroit, laquelle serait remplie d'eau; celle-ci finirait par se remplir entièrement de vin. Du reste, ce tour est des plus jolis, s'il est bien exécuté, et il mérite véritablement d'être appelé un tour de physique.

Aréomètres. 89. Nous ne nous arrêterons pas ici sur les aréomètres, dont toutes les variétés sont décrites dans les traités ordinaires. Nous recommanderons seulement à l'attention des lecteurs l'aréomètre balance de Nicholson, qui sert en effet de balance ordinaire aux minéralogistes; et l'aréomètre centésimal de Gay-Lussac. Nous ferons observer, au sujet de celui-ci, qu'on peut l'appliquer à d'autres liquides que l'alcool, auquel il est consacré; qu'on peut mesurer par un semblable appareil les doses d'acide absolu, ou les quantités de sel que contiennent des dissolutions, sauf toutefois les corrections à faire pour répondre aux variations de température : c'est sous cette forme, principalement, que l'aréomètre peut rendre de continuels et très-importants services.

APPENDICE.

Poids spécifiques. 90. Nous donnons ici la table des poids spécifiques des principales substances, bien qu'on la trouve dans tous les traités de physique, et par-

ticulièrement dans l'*Annuaire*. Nous ferons remarquer, au sujet de la nôtre, qu'elle offre, dans la dernière partie de la liste des solides, des chiffres différents de ceux qu'on trouve partout ailleurs. Cette dernière partie de la table qui concerne les bois, est due à Muschenbrock, dont les expériences trop peu précises n'ont pas été renouvelées par les physiciens modernes, et dont les résultats sont affectés de graves erreurs. On doit remarquer, de plus, que la matière n'est pas susceptible d'une détermination absolue; car un bois diffère en densité du même bois, non-seulement suivant le degré de sécheresse et d'humidité, mais selon l'âge, le terroir, la partie de l'arbre où on le prend; et sur un même terroir, il se trouve d'un arbre au même arbre des différences souvent très-considérables. Il ne paraît donc pas possible de donner un chiffre absolu pour une chose aussi variable que la densité des bois; ceux que nous donnons sont des moyennes prises sur des bois secs qui ont fait le sujet de nos expériences. Nous ajouterons seulement que le dernier chiffre de cette liste, savoir, la densité du liége, peut être considérée comme assez fixe, et qu'en adoptant le chiffre 0,170, nous rectifions une erreur de plus d'*un quart*, admise sur ce bois dans toutes les tables.

TABLE

Du poids spécifique des solides et des liquides.

SOLIDES.	
Platine laminé......	22,069
— filé.........	21,042
— forgé.......	20,337
Or fondu..........	19,258
Tungstène..........	17,6
Mercure à 0°.......	1,3598
Plomb fondu.......	11,323
Palladium..........	11,3
Rhodium...........	11,0
Argent fondu.......	10,474
Bismuth...........	9,822
Cuivre en fil........	8,878
— rouge fondu..	8,788
Nickel.............	8,279
Acier non écroui....	7,816
Cobalt.............	7,812
Fer en barre........	7,788
— fondu.......	7,207
Étain fondu........	7,291
Zinc fondu.........	6,861
Antimoine..........	6,712
Arsenic............	5,700
Jade..............	4,948
Sulfate de baryte....	4,430
Rubis oriental......	4,283
Topaze orientale....	4,011
Saphir oriental......	3,994
Topaze de Saxe.....	3,564
Diamant de........	3,531
— à.........	3,501
— du Brésil.....	3,131
Flint-glass anglais....	3,329
Spath fluor.........	3,191
Tourmaline verte....	3,155

SOLIDES.	
Amiante...........	2,996
Marbre de Paros....	2,838
— variés à.....	2,700
Émeraude verte.....	2,755
Perles.............	2,750
Spath d'Islande.....	2,718
Granit.............	2,710
Quartz jaspe........	2,710
Corail.............	2,680
Cristal de roche pur..	2,653
Quartz agate........	2,615
Feldspath limpide...	2,564
Verre de St-Gobain..	2,488
Porcelaine de Chine..	2,388
— de Sèvres.	2,146
Sulfate de chaux gypse.	2,312
Pierre meulière......	2,484
Pierre à bâtir, de....	2,500
— à..........	1,500
Soufre natif........	2,033
Ivoire.............	1,917
Albâtre............	1,874
Anthracite..........	1,800
Houille compacte....	1,329
Jais..............	1,259
Succin............	1,078
Sodium............	0,973
Glace.............	0,930
Potassium..........	0,865
Bois de	
Buis.............	0,929
Frêne.............	0,845
Hêtre.............	0,826
If...............	0,807

SOLIDES.

Orme	0,800
Poirier	0,764
Pommier	0,733
Chêne de Champagne	0,704
Noyer	0,602
Cèdre	0,561
Tilleul	0,514
Sapin	0,473
Peuplier	0,404
Liége	0,170

LIQUIDES.

Brôme	2,966
Acide sulfurique concentré	1,850
Acide azotique	1,550
— azoteux	1,450
Eau de la mer Morte	1,240
Eau de l'Océan	1,026
Lait (variable), moyenne	1,030
Vin de Bordeaux	0,994
— de Bourgogne	0,992
Huile d'olive	0,915
— essentielle de térébenthine	0,870
Naphte	0,847
Alcool absolu	0,792
Éther sulfurique	0,7155

GAZ.

Air	0,001299

GAZ.

Air	1,000
Vapeur de bichlorure d'étain	9,199
Vapeur d'iode	8,716
— de mercure	6,976
— de soufre	6,617
— d'essence de térébenthine	4,763
Gaz hydriodique	4,443
— fluo-silicique	3,573
Hydrogène arséniqué	2,695
Vapeur d'éther sulfurique	2,586
Chlore	2,470
Acide sulfureux	2,234
Cyanogène	1,806
Hydrogène biphosphoré	1,761
Protoxyde d'azote	1,526
Acide carbonique	1,5245
— chlorhydrique	1,247
— sulfhydrique	1,191
Bioxyde d'azote	1,039
Hydrogène bicarboné	0,978
Oxyde de carbone	0,957
Ammoniaque	0,597
Hydrogène carboné marais	0,555
Vapeur d'acide cyanhydrique	0,948
Oxygène	1,1057
Azote	0,972
Hydrogène	0,0688
Vapeur d'eau	0,6240

CHAPITRE IX.

HYDRODYNAMIQUE. — LOIS DES CHUTES ET DES ÉCOULEMENTS. — MACHINES HYDRAULIQUES.

Loi de Torricelli.

91. Toute la théorie du mouvement des eaux est régie par le principe de Torricelli : « Que la vitesse d'écoulement d'un liquide qui sort d'un vase par une étroite ouverture percée en mince paroi, est la même que celle d'un corps qui serait tombé de toute la hauteur du réservoir jusqu'à l'orifice. » Les conditions d'étroitesse et de minceur sont rarement remplies, et, par suite, les résultats sont plus ou moins modifiés; mais il reste toujours ce fait, que la vitesse d'écoulement dépend de la hauteur de la masse de liquide, et que la pression se règle d'après les lois de la pesanteur.

La première application de la loi de Torricelli est offerte par les jets d'eau, dont on rend souvent raison par cette loi plutôt que par celle du niveau. En partant du principe, on reconnaît que les molécules d'eau poussées par la pression qui s'exerce à l'orifice, doivent monter à une hauteur due à la vitesse acquise après une chute de toute la hauteur du réservoir; et on sait que cette hauteur est égale à celle de la chute. Les clysoirs de caoutchouc, que tout le monde connaît, et qu'on fait fonctionner si simplement en tenant

leur entonnoir aussi élevé que possible, sont une application semblable de la loi de Torricelli.

Chutes et cours d'eau.

92. Si l'on fait abstraction des pertes dues au frottement dans le lit d'un canal naturel ou artificiel, ou contre les parois d'un tuyau, l'écoulement des eaux à la surface de la terre se fait d'après la loi de Torricelli, et la rapidité du cours augmente considérablement avec sa pente. Car la formule $V = \sqrt{2gh}$ s'applique aussi bien aux chutes inclinées qu'aux chutes verticales; et si la hauteur d'un plan incliné est de 5 mètres, par exemple, sa longueur étant de 10 kilomètres, ce qui ne donne qu'un demi-millimètre par mètre, pente extrêmement faible, la vitesse acquise par le liquide sera la même que s'il fût tombé verticalement d'une hauteur de 5 mètres. On peut donc apprécier la vitesse d'un courant par la pente de son lit.

Si le cours d'eau a une pente suffisante, on pourra l'utiliser par une prise ou dérivation faite à une certaine distance d'un moulin. On fera à la rivière un lit artificiel ayant une moindre pente que le cours principal et aboutissant au point où l'on a besoin d'une chute; là on laissera tomber l'eau sur les aubes ou palettes d'une roue motrice, et le liquide, après avoir produit son effet, rejoindra le cours principal. Ainsi, au lieu du courant plus incliné *o* D *m*, on aura le courant moins incliné *on*, qui donnera en *n* la chute *n*D, et continuera son cours suivant D*m*, après avoir rejoint le premier. Il semble,

d'après les principes sus-énoncés, que la vitesse du cours oD en D doit être la même que la chute donne au cours supérieur, et qu'on pourrait aussi bien faire agir le cours oD sur les palettes de la roue du moulin, que la chute elle-même. Mais il est très-important de remarquer que le frottement dans son canal détruit une grande partie de la vitesse du cours oD; et cela a toujours lieu, sans quoi la rapidité des fleuves s'accroîtrait selon les lois de la chute verticale, ce qui est démenti par l'expérience. Au contraire, la chute de n en D jouit de toute sa puissance verticale, et elle heurte la roue avec bien plus d'énergie que ne le ferait un courant incliné avec la même différence de niveau.

Au lieu de faire des prises ou des dérivations pour les dépenser en chutes, on barre souvent les ruisseaux par des écluses à vannes qui retiennent l'eau dans des bassins au-dessus de son niveau naturel : en ouvrant la vanne, on laisse tomber l'eau sur la roue; cela revient évidemment au système qui précède. Il est d'ailleurs manifeste que la hauteur de l'eau au-dessus de la vanne a une grande influence sur l'effet produit.

93. Lorsqu'on veut joindre deux cours d'eau naturels par un canal, il arrive presque toujours qu'on trouve, entre le point de départ et le point d'arrivée, une différence de niveau plus ou moins considérable; de telle sorte qu'il serait impossible d'opérer une jonction simple, car on aurait alors, dans toute l'étendue du canal, une véritable chute d'eau qui serait impropre à la navigation. On ra-

chète alors la pente par des bassins d'écluses; et le canal, composé de portions détachées, ressemble en quelque sorte à un escalier. On peut dire qu'il se compose de plusieurs canaux mis bout à bout, mais à des étages différents; un étage est séparé de l'autre par un bassin dans lequel le niveau de l'eau est mobile, au moyen des vannes de déversement en aval et en amont. L'ascension ou la descente d'un bateau le long de cette ligne étagée s'exécutent suivant le système que nous avons décrit au n° 74.

94. La vitesse d'un même cours d'eau en ses différents points dépend de la largeur de son canal, et elle est en rapport inverse de la section. Aussi partout où un ruisseau se rétrécit, voit-on l'eau animée d'une grande vitesse, et cela à une très-petite distance d'un point où elle paraît dormante. On utilise cette propriété pour accélérer les courants dont on veut frapper les palettes des roues de moulin : si l'on en fait une chute, les aubes sont mues et par la vitesse due à la chute et par la vitesse acquise par le courant. Ces deux vitesses donnent un résultat composé égal à leur somme. Vitesse.

95. Lorsque les masses d'eau en mouvement sont considérables, elles exercent, contre les obstacles qu'elles rencontrent, des efforts destructeurs. On sait que des ponts sont souvent emportés par des crues d'eau : cela vient non-seulement de ce que la masse des eaux augmente, mais aussi de ce que la pression et, par suite, la vitesse augmentent avec la hauteur, d'après la loi de Torricelli.

La puissance du choc, qui est en raison composée de ces deux éléments, peut donc dépasser la résistance du pont. Les glaces charriées par les fleuves sont encore plus destructives; car elles arrivent avec toute la vitesse du courant, et frappent les obstacles seulement en quelques points qu'elles ébranlent, au lieu d'éparpiller leur énergie comme font les liquides. C'est pour mettre les bateaux à l'abri de ce choc, que l'on construit soit des gares, soit de simples estacades.

96. On se sert du choc de l'eau pour mettre en mouvement diverses machines. Tantôt l'eau n'agit que par son poids, tantôt par sa vitesse acquise; le plus souvent c'est par les deux à la fois.

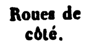
Machines hydrauliques.

Outre la machine à colonne d'eau de Reichenbach, les bateaux, voitures et tourniquets à réaction, l'eau agit encore par son simple poids dans les roues à augets, dites *roues en dessus*.

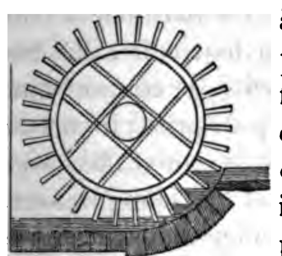
Roues en dessus.

L'eau arrive sans impulsion aucune d'un bief ou bassin de retenue, et tombe dans des augets disposés de telle sorte sur la circonférence d'une roue, qu'elle ne peut se déverser au dehors des augets que lorsque chacun a parcouru un quart ou un tiers de circonférence. C'est le poids seul de l'eau contenue dans ces augets qui détermine la rotation de la roue. On donne à ces roues de grandes dimensions tant en diamètre qu'en épaisseur, et les augets suffisamment

grands peuvent recevoir plusieurs centaines de kilogrammes d'eau. Mais elles exigent que la chute ait une assez grande hauteur, puisqu'il doit y avoir, entre le bief du canal d'arrivée et le canal de fuite, une différence égale au diamètre de la roue tout au moins.


Roues de côté.

Le système d'un choc composé de la vitesse acquise et du poids du liquide, est réalisé dans les *roues de côté*, qui offrent le système le plus commun dans les moulins à eau. Ce sont des roues à palettes; celles-ci sont frappées, sur un quart de circonférence environ, par l'eau qui arrive directement d'un courant, glisse sur un plan incliné en rejaillissant sur les palettes, et finit par se rendre dans un canal inférieur. Ces roues sont généralement animées d'une plus grande vitesse que les précédentes, et elles n'exigent pas une aussi grande différence de niveau entre les deux courants.



Roues en dessous.

On trouve un mouvement dû à la seule vitesse dans les *roues en dessous*, dont la moitié à peu près plonge dans l'eau; il n'y a aucune chute qui les frappe, et elles ne sont mises en mouvement que par l'impulsion du courant contre les palettes. Ces roues ont moins de



puissance que les précédentes, mais elles ont le mérite de la simplicité, et celui de n'exiger ni double cours ni chute d'eau.

Roues à aubes courbes. Au lieu des roues verticales, on emploie aussi des roues horizontales qui se meuvent dans l'eau courante. Qu'on suppose des aubes courbes disposées toutes de la même manière; il en résultera que, selon qu'on regardera ces aubes à gauche en A, ou à droite en D, elles présenteront leur concavité ou leur convexité. Sur la concavité, le courant aura beaucoup de prise; il en aura très-peu, au contraire, sur la convexité, où il glissera. Il y aura donc en A et en D des pressions très-inégales; d'où un mouvement dans le sens de la plus grande, c'est-à-dire, dans le sens A B D. Ce système est très-simple, mais d'un médiocre effet.

Turbines. 97. On emploie divers systèmes de roues horizontales, connues sous le nom de *turbines*, à cause des tourbillons que leur mouvement produit dans l'eau autour d'elles. Ces machines offrent l'avantage très-précieux de fonctionner même quand elles sont plongées entièrement sous l'eau; de sorte qu'elles servent aussi bien dans les cas d'inondation que dans les cas ordinaires, ce que ne peuvent faire les roues dont il a été question jusqu'à présent. De plus, la position verticale de leur axe dispense des pièces de renvoi, qui sont nécessaires pour

transformer le mouvement de rotation horizontal de l'arbre en un mouvement vertical, comme l'exige particulièrement le genre de mécanisme des moulins. Parmi les diverses sortes de turbines, deux surtout méritent d'être signalées.

La turbine dite *à force centrifuge,* imaginée par M. Burdin, mais considérablement perfectionnée par M. Fourneyron, reçoit l'eau du courant par l'intermédiaire d'une grande cuve; cette eau tombe dans un des compartiments circulaires et concentriques dont se compose la roue, et se trouve dirigée par des cloisons convenables sur des aubes courbes, qui divisent de distance en distance le compartiment extérieur. L'eau arrive de telle sorte, qu'elle suit la courbure des aubes; mais par l'effet de ce mouvement curviligne, elle acquiert une force centrifuge, en vertu de laquelle elle presse contre la concavité de ces aubes. Le résultat de cette pression est le mouvement des aubes, et par suite de tout le système de la roue. Dans de bonnes conditions d'établissement, la turbine Fourneyron paraît donner en moyenne 75 pour 100 de la force motrice. **Turbine de Burdin et Fourneyron.**

Au moment où nous écrivons ceci, il est question d'établir plusieurs turbines de ce genre sur la Seine, au-dessous du Pont-Neuf à Paris, à l'effet de faire jouer des pompes qui donneraient une masse d'eau considérable, et alimenteraient un grand nombre de nouvelles fontaines. Les turbines recevraient l'eau déversée par une digue construite dans le sens du cours de la Seine, à

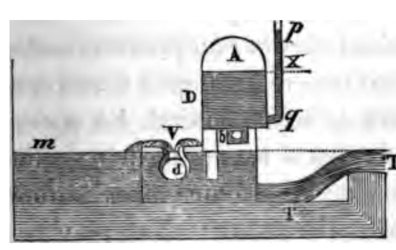
partir de la pointe du terre-plein jusqu'à un barrage transversal construit en face de la Monnaie. Ce barrage à portes mobiles aurait lui-même pour effet d'élever à volonté les eaux du fleuve en amont, pour rendre la Seine navigable en tout temps, même pendant les eaux très-basses. On a reconnu d'ailleurs que six grandes turbines suffiraient pour faire fonctionner quatre cents paires de meules, et moudre tout le blé nécessaire à la consommation de Paris; ce qui serait un avantage inestimable en cas de siége. Dans ce système, les turbines pourraient aussi fournir assez d'eau pour remplir en quantité suffisante les fossés de l'enceinte des nouveaux remparts.

Turbine Passot. La nouvelle turbine de M. Passot a, sur toutes les autres machines de ce genre, l'avantage d'une extrême simplicité. C'est un tambour traversé par un axe vertical, et maintenu constamment plein d'eau. Contre l'enveloppe, à l'intérieur, sont fixés trois appendices cunéiformes qui présentent leur tête à la pression de l'eau; cette pression fait tourner le système par *réaction*, et l'eau s'écoule par des orifices obliques percés dans la paroi du tambour. Dans toutes les machines hydrauliques, les chocs exercés par le liquide moteur contre les aubes occasionnent une perte de force qu'on s'est évertué à diminuer autant que possible; dans la turbine de M. Passot, cette perte n'existe pas, la roue étant mue par une simple et constante *pression* due à la poussée latérale. Une expertise judiciaire a constaté que, dans des circonstances

d'ailleurs peu favorables, cette turbine donnait un minimum de 60 pour 100 de la force motrice; et il n'y a pas lieu de douter que, dans de bonnes conditions, la machine ne rende notablement davantage. La très-grande simplicité de cette turbine, qui donne une économie considérable sur les frais d'établissement et sur ceux d'entretien, la rend très-digne de l'attention des industriels.

Bélier hydraulique.

98. Nous mentionnerons encore une machine hydraulique très-remarquable par ses résultats et le principe de son action. C'est le *bélier hydraulique* de Montgolfier. Son jeu repose sur ce principe, que lorsqu'un liquide en mouvement est arrêté tout à coup en un point de son cours, les parties arrivantes se pressent contre les parties arrêtées et agissent de tous côtés contre les parois de l'obstacle. De cette pression et de la réaction qu'opposent les parois, résultera l'accumulation du liquide vers certains points où son cours naturel ne l'élèverait pas.



Qu'on imagine un tuyau TT par lequel arrive l'eau d'une chute quelconque dans l'intérieur de la machine. En V est une ouverture par laquelle cette eau sortirait, s'il n'y avait pas d'obstacle. Mais là est suspendu par des courroies un boulet creux *d* d'une densité double de celle de l'eau, et qui, par l'effet de la vitesse de

celle qui se précipite vers ce point, peut être soulevé contre l'orifice V, et le fermer hermétiquement. En D se trouve une cloche de fonte au bas de laquelle est une soupape analogue, fermée par un autre petit boulet *b*. Par le jeu de la machine, la cloche se remplit partiellement d'eau, que surmonte un coussin d'air en A. Au bas de la cloche est adapté un tuyau d'ascension *pq*.

Lorsque l'eau arrive par TT avec la vitesse de la chute, elle ne tarde pas à soulever le boulet *d*, et fermer l'ouverture V. Continuant de se mouvoir après que la *soupape d'arrêt* lui a ainsi fermé le passage, elle accumule ses efforts contre les parois du tuyau et contre la *soupape d'ascension* *b* qui est soulevée, de sorte que l'eau passe en certaine quantité dans la cloche; la réaction élastique des parois aide à cet effet. L'ascension de l'eau est limitée tant par la mesure de l'effort précédent, que par l'élasticité de l'air A, que cette ascension comprime. Lorsque l'effort est usé par les mouvements qu'il a produits, le petit boulet *b* retombe et ferme la cloche, et la compression subie par l'air A, réagissant contre l'eau qu'il surmonte, l'oblige à passer dans le tuyau latéral. En même temps que le petit boulet *b* est tombé, le grand boulet *d* en a fait autant; les circonstances sont les mêmes qu'à l'origine du jeu de la machine; il y a eu un *coup de bélier;* et un second coup va se produire de la même manière et amener le même résultat. Il semble que, par suite de ce jeu continu de la machine, l'eau peut monter indéfiniment dans le

tuyau d'ascension ; mais il est aisé de reconnaître que la force du courant étant supposée constante, il passera, à chaque coup de bélier, une même quantité d'eau dans la cloche, et que l'air en A sera toujours comprimé de la même quantité. Or, la colonne du tuyau *pq* va en augmentant; donc il viendra un moment où le poids de cette colonne, au-dessus du niveau A*x*, fera équilibre à l'excès de l'élasticité de l'air comprimé en A sur la pression atmosphérique en *p*; dès lors l'ascension s'arrêtera. Ainsi la hauteur de la colonne élevée dépend de l'élasticité de cet air A, ou, ce qui revient au même, de la quantité d'eau qui passe dans la cloche à chaque coup de bélier, ou enfin de la vitesse de la chute qui sert de moteur au système, en même temps que de l'étendue des parois qui réagissent contre la poussée. — On dit que le bélier hydraulique donne 60 p. 100 de la force motrice, ce qui est un très-bon résultat.

99. La formule $V^2 = \sqrt{2gh}$ donne le moyen de mesurer la vitesse d'une eau courante en un point quelconque, en se servant d'un simple tube de verre recourbé horizontalement; on tient ce tube dans une position verticale, en appuyant l'ouverture du coude au point A du courant dont on veut avoir la vitesse. D'abord l'eau s'y élève en *m* jusqu'à la ligne extérieure, par la loi du niveau; mais, de plus, elle s'élance au-dessus de *m*, en vertu de la vitesse d'écoulement. Or, on sait que la vitesse avec laquelle un corps doit être lancé Tube de Pitot.

pour atteindre une hauteur n est la même que celle acquise en tombant de cette hauteur. Donc en mettant pour n, dans la formule $V^2 = 2gh$, la hauteur mn à laquelle l'eau s'élance, on aura la vitesse du courant au point éprouvé. Soit $h = 0^m,7$... d'ailleurs $2g = 19,6$... d'où $v = \sqrt{13,72} = 3^m,7$. Le tube ainsi employé porte le nom de *tube de Pitot*. Placé à l'avant des navires, il donne la vitesse du bâtiment.

Loch. 100. Toutefois, ce n'est point ainsi qu'on détermine ordinairement cette vitesse. On se sert du *loch*, petite pièce de bois triangulaire qu'on jette à la mer et qu'on suppose rester en place, tandis que, par l'effet de la marche du navire, se déroule la corde pendant une $\frac{1}{2}$ minute. Cette corde est divisée par des nœuds qui ont un rapport déterminé avec la lieue marine, dont chacun de leurs intervalles est la 360ᵉ partie ; ce qui revient à la 120ᵉ partie du tiers de cette lieue. Or, la lieue marine étant de 17,109 pieds (ancienne mesure), l'intervalle des nœuds se trouve de $47\frac{1}{2}$. L'expérience durant une demi-minute, et l'heure contenant 120 demi-minutes, il s'ensuit que pour chaque nœud qui filera dans l'intervalle de la demi-minute, il y aura un tiers de lieue. Un navire *filant* 8 *nœuds*, fait par heure huit tiers de lieues marines ; 10 *nœuds filés* font 10 tiers, ce qui est une bonne vitesse. Je ferai remarquer qu'un tiers de lieue marine est la même chose qu'une *minute de degré*, ou un *mille géographique*. Un navire filant 10 nœuds, court 10 minutes ou

un sixième de degré par heure; ce qui revient à 18,510 mètres, ou plus de $4\frac{1}{2}$ lieues métriques. Il existe d'ailleurs, dans l'emploi du loch, un certain nombre de précautions indispensables pour garantir, jusqu'à un certain point, ses indications, et qu'on trouvera dans les ouvrages relatifs à la marine.

101. Pour mesurer le produit d'un cours d'eau sur une section donnée, on multiplie la surface de la section par la vitesse du courant, ou plutôt par l'espace que le courant parcourt pendant le temps considéré; il est évident que le prisme que ce produit représente est bien le volume d'eau qui passe par la section dans un temps donné. Supposons, par exemple, une section trapézoïde comme équivalente à un rectangle de $5^m,25$ de base, et $1^m,6$ de hauteur; de plus, la hauteur dont, en vertu de la vitesse moyenne, l'eau s'élève dans le tube de Pitot, sera de $0^m,41$. On aura, pour le volume fourni dans une minute ou 60 secondes, $60 \,.\, 5{,}25 \,.\, 1{,}6 \,.\, \sqrt{19{,}6 \,.\, 0{,}41} = 1425$ mètres cubes. On a trouvé que sous le pont Royal, à Paris, la Seine débitait 14,760 mètres cubes par minute dans les moyennes eaux. Au point le plus bas où les eaux aient jamais été observées (1767 et 1803), on n'avait que 4,500 mètres cubes, et dans la plus grande crue qui ait été mentionnée (1615), le débit allait à 84,000 mètres. Ces deux volumes extrêmes sont entre eux comme 1 : 18,6. Sous le pont Louis XVI, on trouve pour débit *moyen*, 15,300 mètres cubes par minute. Jaugeage des cours d'eau.

102. Pour évaluer le produit d'une source d'eau Des sources quelconques.

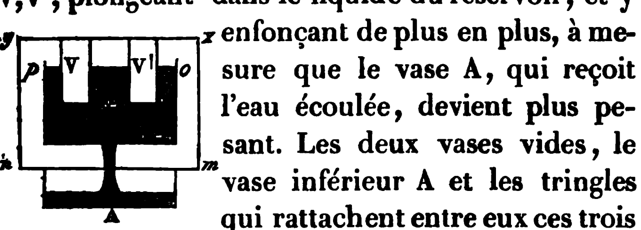
quelconque, on se servait d'une unité nommée *pouce d'eau*, ou *pouce de fontainier*. On désignait ainsi le produit obtenu en une minute d'une source coulant par un orifice d'un pouce de diamètre sous la pression d'une ligne au-dessus de ce trou, ou de 7 lignes au-dessus de son centre. Le *demi-pouce* correspondait à un orifice d'un demi-pouce de diamètre, sous la même pression; la *ligne d'eau* à une ligne de diamètre, également sous une pression d'une ligne. Le cercle d'un demi-pouce de diamètre n'est en surface que le quart de celui d'un pouce; le cercle d'une ligne en est la 144e partie; de sorte que les produits se trouvent dans le même rapport, c'est-à-dire, que le demi-pouce d'eau est le quart, et la ligne d'eau est la 144e partie du pouce. Le pouce d'eau est un cylindre ayant pour base un cercle d'un pouce de diamètre, et pour hauteur 880 pouces. Il équivaut à 14 litres et un tiers. Une source qui donnerait 25 pouces d'eau débiterait 350 litres par minute.

Si donc on veut évaluer en pouces d'eau un produit donné en litres, il n'y a qu'à diviser ce produit par 14,33. Mais l'usage désormais exclusif du système métrique décimal doit faire supprimer cette sorte d'unité, dont l'emploi, même dans l'ancien système de mesures, était peu rationnel. Car on ne se faisait guère l'idée du volume donné par un certain nombre de pouces d'eau qu'en le rapportant à la pinte dont chaque pouce d'eau valait 14, et multipliant par 14 le nombre de pouces d'eau donné. Or, il était, par conséquent,

beaucoup plus simple d'énoncer le produit immédiatement en pintes. Aujourd'hui c'est le litre, et ses multiples, le décalitre, l'hectolitre, le kilolitre ou mètre cube, qui doivent être exclusivement employés pour évaluer les produits hydrauliques.

103. Dans l'étude qu'on fait sur les vitesses d'écoulement des eaux, on a souvent besoin de maintenir le niveau constant; car, d'après le principe de Torricelli, ce n'est qu'à cette condition que la vitesse peut se maintenir constante. C'est à quoi l'on parvient de plusieurs manières, dont deux peuvent être indiquées ici. La première consiste à faire arriver dans le vase d'où l'eau s'écoule, plus d'eau qu'il n'en sort; de cette manière, le vase reste évidemment toujours plein, et il y a même un excédant qui déborde le long des parois. C'est la méthode du *trop-plein*. **Niveau constant.**

Le second procédé consiste dans l'emploi du *flotteur de Prony*, appareil fondé sur le principe d'Archimède. Il se compose de deux vases vides V,V', plongeant dans le liquide du réservoir, et y **Flotteur de Prony.**



enfonçant de plus en plus, à mesure que le vase A, qui reçoit l'eau écoulée, devient plus pesant. Les deux vases vides, le vase inférieur A et les tringles qui rattachent entre eux ces trois vases, forment un système unique qui plonge en partie dans l'eau, et qui doit toujours peser autant que le volume d'eau déplacé. Si donc, par suite de l'écoulement, le vase A reçoit un litre ou un

kilogramme d'eau de plus, le système du flotteur, pesant un kilogramme de plus, doit déplacer un nouveau volume d'eau pesant un kilogramme, ou un volume d'un litre de plus. Il s'enfoncera donc d'un litre dans le réservoir; ce qui ne peut se faire, à moins que le niveau ne remonte; et comme le volume d'eau en réservoir regagne un litre par la substitution d'un égal volume des vases vides, il est évident que le réservoir reprend son niveau primitif. Il est inutile de faire remarquer que l'effet se produit d'une manière continue.

Ondulations. 104. Nous terminerons ce sujet en signalant l'application des ondes circulaires qui se produisent sur l'eau agitée en un point, pour mesurer la largeur du canal où elle coule. Ces cercles concentriques sont produits, comme on sait, par les mouvements oscillatoires des colonnes liquides qui descendent et montent successivement à partir du point ébranlé, comme le feraient deux colonnes d'eau contenues dans un tube en U, auquel on imprimerait quelque agitation. Les premières ébranlées communiquent leur mouvement aux suivantes par un effet de frottement, d'affinité, et surtout par suite de la rupture du niveau qui tend à se rétablir, et le mouvement se propage ainsi de proche en proche à une grande distance. Cette manière d'envisager le principe des ondulations prouve, ce que l'expérience confirme, savoir, qu'il n'y a pas de mouvement de translation à partir du point agité, mais que chaque colonne liquide oscillante conserve sa place tout en com-

muniquant son mouvement à ses voisines. Or, de ceci il résulte, comme on peut le reconnaître encore par l'expérience, que tous les cercles ondulatoires sont concentriques, et que l'ébranlement s'étend autour du point ébranlé à d'égales distances, dans des temps égaux. Si donc, dans un canal dont on veut déterminer la largeur, on excite un ébranlement en un point *o* sur l'un des bords, ce sera le centre d'une foule de cercles, ou plutôt de demi-cercles, dont les diamètres seront sur ce bord. Si, au moment où l'un de ces cercles vient toucher le second bord en un point *t*, on marque les deux points *mn*, où le bord antérieur est rencontré par ce cercle, la demi-distance *mn*, qu'on pourra mesurer, donnera la largeur du canal.

CHAPITRE X.

PESANTEUR ET ÉLASTICITÉ DE L'AIR. — BAROMÈTRE. — LOI DE MARIOTTE.

Pesanteur de l'air.

105. L'air est pesant; l'air est élastique, et son élasticité est modifiée par son propre poids et par les pressions extérieures. Le rôle de l'air, dans tous les phénomènes physiques, repose entièrement sur cette double propriété.

C'est à la pesanteur de l'air qu'on doit l'ascension, ou plutôt la station du mercure dans le baromètre, ainsi que les variations que cette hauteur subit. Mais il est rare que les effets attribués au vide dérivent véritablement de cette cause; c'est à la diminution de force élastique qui accompagne la raréfaction qu'il faut les attribuer.

La pesanteur de l'air agit dans tous les sens; les effets qu'elle produit résultent le plus souvent de pressions latérales ou de pressions de bas en haut. En cela, l'air agit comme les liquides, auxquels, en ce qui concerne la pesanteur, il doit être entièrement assimilé.

106. Aussi ferons-nous observer d'abord que les corps perdent dans l'air une partie de leur poids égale au poids du volume d'air dont ils occupent la place. Quoique le poids de l'air soit peu considérable sous un volume médiocre, cette perte

n'est pas à négliger dans les pesées précises et délicates. Un litre d'air pèse 13 décigrammes; un corps qui n'a qu'un décimètre cube de volume, et qui peut ne peser que quelques grammes, perd donc plus d'un gramme dans l'air. Il est vrai que tous les corps étant pesés dans ce fluide, et la perte du corps pesé étant toujours la même, il semble qu'on peut en faire abstraction. Mais il faut remarquer ici que la densité de l'air varie, pour ainsi dire, sans cesse, par suite des changements de température et de pression; d'où il suit qu'un même corps perd plus ou moins de son poids, d'un jour à l'autre; dans un air plus chaud, et par suite moins pesant, il perdra moins; et si on le pesait à une grande profondeur, ou à une grande hauteur, il se trouverait dans des airs de densités assez inégales : la perte de poids varierait donc aussi. Dans certains cas de pesées très-précises, on doit tenir compte de ces différences, qui sont d'ailleurs assez sensibles, pour qu'une fois l'équilibre établi, on le voie rompu une heure après, par suite d'un changement considérable de température.

107. Toutes les fois que le vide est fait dans une capacité quelconque, le poids de l'air extérieur presse sur les parois qu'il touche, sans être équilibré par l'air intérieur; il tend donc à les briser, et ce n'est qu'à la condition d'une solidité suffisante qu'on peut faire le vide dans ces vases. La pression que l'atmosphère exerce dans ce cas est rendue bien

sensible par l'expérience des hémisphères de Magdebourg. Si on donne un décimètre carré de base aux deux calottes qui composent la sphère creuse, il faut, si le vide est à peu près complet à l'intérieur, 100 kilogrammes de force pour les séparer. Si donc ces calottes avaient peu d'épaisseur, l'air qui les presse au dehors les écraserait inévitablement. C'est ce qu'il ne faut jamais perdre de vue lorsqu'on veut se servir d'un vase pour y produire le vide.

Si la capacité dans laquelle on fait le vide est close au moyen d'un piston, il est évident que le mouvement de ce piston éprouvera de l'air extérieur une résistance que, dans certains cas, il ne pourra pas vaincre; car chaque centimètre carré de surface est pressé par plus d'un kilogramme. Aussi, dans les anciennes machines pneumatiques, avait-on une peine extrême à faire mouvoir le piston après les premiers coups. Car lorsqu'il n'y a dans le récipient que de l'air raréfié, il ne réagit que faiblement contre la pression extérieure, et celle-ci agit avec la différence des deux forces. Aussi appliquait-on, dans ces machines, un étrier au piston, et l'opérateur appuyait de tout le poids de son corps sur cet étrier. Dans les machines modernes, on emploie le poids de l'air à neutraliser cette force elle-même. Il y a deux corps de pompe et deux pistons dont les tiges se rattachent l'une à l'autre par une roue dentée; or, l'effort que la pression atmosphérique produit sur l'un est équilibré par une pression égale qu'elle

produit sur l'autre; c'est une sorte de balance dont les deux bassins sont pressés par des poids égaux, et à chacun desquels la moindre force peut imprimer un mouvement ascendant. Dans ce système, le poids de l'air est donc sans action sur les pistons, et il n'y a d'autre force à vaincre que la résistance des frottements.

Le *tire-pavé* est un jeu d'enfant dont l'effet est produit par la pression de l'air. On applique avec les pieds, contre un pavé uni, une rondelle de cuir mouillé dont les bords se collent contre la pierre, et dont le milieu est traversé par une corde qu'arrête un nœud *n*. En tirant la corde et le nœud, on tend le cuir qui forme autour du pavé un cône ou chapeau *m n* P, et il faut un effort considérable pour détacher le cuir. Cela vient de ce que l'air extérieur pèse sur ce cuir, et qu'il n'y a au-dessous que le vide. Toutefois, ce vide n'étant pas absolu, car il y a nécessairement un peu d'air emprisonné sous le cuir, surtout dans le voisinage du nœud, sans compter celui qui se glisse par le trou autour de la ficelle, on conçoit que le disque ne doit pas tarder à se détacher. Néanmoins, on peut enlever, par ce moyen, une ardoise, ou un carreau en brique.

108. La pression de l'air soutient les liquides dans les vases dont l'orifice est renversé, quand cet orifice est suffisamment étroit. C'est ce qui fait que l'eau ne sort qu'avec la plus grande peine d'une bouteille à goulot d'un petit diamètre. C'est

aussi pour cela que le vin ne sort pas d'un tonneau par un trou latéral ou par le robinet, tant qu'on n'a pas enlevé la bonde; quand celle-ci est ôtée, la pression atmosphérique en B neutralise la pression en *o*, et le liquide s'écoule en vertu de son propre poids. On explique de la même manière l'emploi du *tâte-liqueur*. On plonge dans un liquide le tube *m* A; puis, appliquant le doigt sur le sommet du tube, on retire celui-ci sans que le liquide tombe; la chute n'a lieu que lorsqu'on a retiré le doigt, après avoir transporté le tube au lieu où l'on en doit faire usage. Si le tube n'a été plongé que partiellement, de sorte qu'il reste de l'air entre le liquide et le doigt, une partie du liquide s'écoule au moment où on le retire; le reste est soutenu par la pression extérieure; car cette pression ne peut être élidée par l'air intérieur, cet air étant dilaté par la sortie d'une petite portion du liquide.

On a fondé, sur cet effet de la pression latérale et ascensionnelle de l'air, une foule de jeux physiques, parmi lesquels nous ne citerons que l'entonnoir magique, qu'on emploie de deux façons.

Entonnoir magique.

Cet entonnoir est double, comme le représente la figure; et à la jonction des deux pièces sur le bord supérieur de l'entonnoir, se trouve un petit trou qu'on aperçoit en A. Si l'intervalle des deux fonds est rempli d'eau par un moyen quelconque, comme, par exemple, en introduisant ce liquide par l'orifice *o*, tandis que le trou en est tenu

fermé avec le doigt, le liquide ne coulera pas dans la position que l'entonnoir occupe sur la figure, tant que le doigt sera appliqué en A, à cause de la pression atmosphérique qui agit en *o*. Toutes les fois qu'on déplacera légèrement le doigt, la pression de l'air en A neutralisera celle en *o*, et le liquide coulera : il s'arrêtera immédiatement quand le doigt se replacera en A. Or, comme ce mouvement du doigt peut être produit d'une manière insensible aux spectateurs, l'écoulement sera intermittent à la volonté de celui qui opère, et il pourra soumettre la production et la cessation de l'écoulement aux ordres de telle personne de la société qui voudra exercer son empire sur le phénomène. Ce sera une sorte de magicien qui obéira instantanément à la volonté de l'homme.

On emploie l'entonnoir magique d'une façon plus curieuse, et qui est susceptible encore de perfectionnement ; il ne s'agit de rien moins que de changer instantanément l'eau en vin. Pour cela on remplit secrètement de ce dernier liquide la panse de l'entonnoir, et en le tenant de manière que le doigt soit appliqué en A, on empêche, comme ci-dessus, le vin de s'écouler ; puis on verse, aux yeux des spectateurs, de l'eau claire dans la coupe supérieure D*n*A de l'entonnoir. A peine l'eau est-elle versée, qu'on débouche le petit trou A, et le vin s'écoule par l'orifice *o*, comme s'il venait de D*n*A. L'eau semblera donc s'être changée en vin en traversant le tube de l'entonnoir.

Toutefois, réduit à cela, le tour n'est pas complet, et il nous semble susceptible d'un perfectionnement d'une certaine importance. L'eau qui a été versée dans la partie D*n*A de l'appareil, et qui reste après l'écoulement du vin, devient un embarras pour l'opérateur, qui ne peut remuer l'entonnoir sans la renverser, ce à quoi les spectateurs sont naturellement attentifs. Mais qu'au fond de l'entonnoir supérieur il y ait un petit trou *n* bouché avec de la cire, et qu'en versant l'eau qui doit être changée en vin, l'opérateur y jette, à la vue de tout le monde, un petit morceau d'une racine quelconque, d'iris, par exemple, lequel petit morceau sera signalé comme l'agent mystérieux de la métamorphose. Après l'écoulement du vin, on prendra d'une main l'entonnoir par le tube, dont un doigt bouchera l'extrémité, et de l'autre on enlèvera du fond supérieur, pour le montrer à l'assistance et le garder pour une autre opération, le petit morceau de racine magique. Mais tout en prenant ce petit fragment au fond du vase censé vide d'eau, on ôtera, avec le doigt, la cire qui bouche le petit trou *n*, par lequel l'eau s'écoulera dans la panse de l'entonnoir; on conçoit que les diverses parties de l'appareil soient calculées et disposées de telle sorte, que cette panse soit entièrement remplie par la transfusion. Alors on reprend l'entonnoir par l'anse, en appliquant le doigt en A, ce qui empêche l'eau de couler par le tuyau, et on le retourne devant les spectateurs, pour leur montrer

qu'il n'y a pas d'eau dans l'entonnoir DnA, où l'on en avait versé. Le tour ainsi fait, il est facile de se débarrasser de l'entonnoir et du liquide qui y reste, sans attirer l'attention des spectateurs.

Baromètre.

109. Les usages du baromètre sont importants et nombreux. Il sert d'abord à ramener les volumes des gaz à une pression constante; car une même masse de gaz occupant des volumes différents, suivant la pression sous laquelle elle se trouve renfermée dans un vase, le volume d'un gaz ne serait jamais défini, s'il n'était donné à une pression constante et uniforme. On calcule donc, par une proportion, ce que deviendrait un volume donné s'il était pris à la pression constante de 760 millimètres, au lieu de la pression actuelle indiquée par le baromètre. C'est la loi de Mariotte qui fait les frais de cette proportion, comme on l'expose dans tous les traités.

Mesure des hauteurs.

110. Un second usage du baromètre consiste à mesurer les hauteurs, et sous cette forme, l'instrument rend tous les jours de nombreux services. On sait que la colonne mercurielle s'abaisse lorsqu'on s'élève avec le baromètre; qu'elle monte, au contraire, à mesure qu'on porte l'instrument plus bas, ce qui est une conséquence de la diminution et de l'allongement respectifs des colonnes atmosphériques correspondantes aux diverses stations. Or, il y a un rapport mathématique entre les altitudes de ces stations et les mouvements de la colonne mercurielle; ce rapport, s'il est connu, permettra donc de mesurer, par le baromètre,

ces altitudes, et, par suite, les différences de niveau entre deux stations.

Malheureusement ce rapport n'a pas une expression très-simple. Il est exprimé par la formule :

$$z = 18393 \left(1 + \frac{2(t+t')}{1000}\right) \log. \frac{H}{h},$$

dans laquelle z désigne la différence de niveau cherchée, h et H les hauteurs respectives de la colonne barométrique à la station inférieure et à la station supérieure, t et t' les températures thermométriques correspondantes à ces deux stations. Voici trois exemples de calcul.

1° Saussure a trouvé au sommet du mont Blanc la hauteur barométrique............. $436^{mill},7$

A Genève ($51^{m},7$ au-dessus du lac).. 738 ,5

On avait pour somme $t+t'$ des températures des deux stations...... 50°,76...... d'où....

$$z = 18393.\left(1 + \frac{2(50°,76)}{1000}\right) \log. \frac{738,5}{436,7}$$

$$= 18393.1,1015.0,2281673.$$

$$z = 4409^{m},7.$$

A quoi ajoutant $51^{m},7$ pour la hauteur du point d'observation à Genève, et 1 mètre pour la hauteur du sommet de la montagne, au-dessus de la cuvette du baromètre au moment de l'observation, il vient $4462^{m},25$ pour la hauteur du point culminant au-dessus du niveau du lac.

Soit, en second lieu, l'exemple suivant :

A la station inférieure, la hauteur du baromètre était........................ 768^{mill}

A la station supérieure............ 631

Le thermomètre marquait en bas 22°,5, en haut

13°,4; mettant ces quatre valeurs dans la formule, on a :

$$z = 18393\left(1 + \frac{2(22°,5 + 13°,4)}{1000}\right)\log.\frac{768}{631}, \text{ d'où}$$

$$z = 18393 . 1,0718 . (\log. 768 - \log. 631)$$

$$= 19713,6174 . 0,08533186 . = 1669^{m},12.$$

Soient, pour troisième exemple :

$$h = 762 \ldots \mathrm{H} = 751 \ldots t = 21° \ldots t' = 17°,$$

on a :

$$z = 18393\,(1 + 0,076)\log.\frac{762}{751}$$

$$= 18393 . 1,076 . 0,00632103 = 125^{m},10.$$

L'expérience prouve, d'ailleurs, que jusqu'à 100 mètres, et même un peu au delà, les dépressions barométriques sont sensiblement proportionnelles aux différences de niveau, et qu'un millimètre d'abaissement correspond à $10^{m},7$ d'élévation. On pourrait donc mesurer, par ce moyen, la hauteur des édifices. Toutefois, il faut remarquer qu'une fraction de millimètre a une certaine influence sur le résultat de la mesure dans une si petite étendue, et qu'il n'est pas facile de mesurer un quart de millimètre.

On trouve, dans l'Annuaire du Bureau des longitudes, une table qui donne le résultat du calcul tout fait, pour diverses hauteurs barométriques ; toutefois, avec les corrections qu'il y faut appliquer, cette table ne nous paraît pas d'un emploi beaucoup plus commode que la formule logarithmique.

111. On peut employer le baromètre à siphon fermé pour déterminer la variation de la pesanteur d'un lieu à un autre. Pour cela, on ferme le siphon

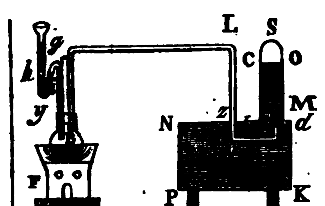
en s, et l'on emprisonne dans cette région un certain volume d'air sm, qui, par son élasticité, fait équilibre à la colonne bn. Si l'on transporte l'instrument dans un lieu où la pesanteur soit plus grande, l'élasticité de cet air ne pourra plus soutenir qu'une plus petite colonne de mercure, puisque ce liquide pèsera autant sous un plus petit volume ; la colonne descendra donc en k, par exemple, et remontera de l'autre côté en x; mais comme elle refoulera l'air, celui-ci gagnera en force élastique, par la loi de Mariotte, et maintiendra la colonne mercurielle dans une certaine position d'équilibre. On mesurera le volume réduit de l'air sx, et la hauteur ko de la nouvelle colonne, et l'on en déduira aisément la nouvelle pesanteur. Voici comment on fait le calcul :

Soient g la première pesanteur, g' la nouvelle qui est inconnue. En multipliant les sections du tube par les hauteurs, on aura les volumes respectifs v, u du mercure et de l'air, dans le premier cas ; v', u', leurs volumes dans le second. Les pressions correspondantes seront évidemment vg, ug, $v'g'$, $u'g'$. Et comme les volumes d'air sont inverses des pressions, et que les pressions sont simplement proportionnelles aux hauteurs h, h' des colonnes mercurielles, on aura $u' : u :: hg : h'g'$, d'où $g' = \frac{uhg}{u'h'}$. Or, on connaît h, h', u, u', et $g = 9{,}8088$; on calculera donc aisément g'. Il est bien entendu que le volume u', qui est affecté par les différences de température, sera, ainsi que le

volume u, réduit à zéro par la loi de Gay-Lussac.

Il faut faire remarquer que ce procédé est très-inférieur en mérite à celui qui repose sur les oscillations du pendule.

112. La pesanteur et l'élasticité de l'air jouent un rôle important dans la manipulation des gaz. Voici comment on procède pour recueillir ces invisibles corps. Manipulation des gaz.



On opère sur une cuve carrée remplie d'eau, dans laquelle trempe une petite planche horizontale *db* appliquée à la paroi, et percée d'un ou plusieurs trous *i*. On plonge dans la cuve une cloche longue ou *éprouvette*, qui s'emplit d'eau, et que, *sans faire sortir son orifice de l'eau,* on place verticalement sur la planche au-dessus du trou *i*. L'eau se soutient dans l'éprouvette au-dessus de son niveau dans la cuve, par l'effet de la pression extérieure, et elle s'y maintiendrait encore si l'éprouvette avait dix mètres de hauteur, car telle est environ la colonne d'eau dont le poids fait équilibre à une pression atmosphérique. Mais il est clair que cette suspension de l'eau dans l'éprouvette n'aurait pas lieu, si, en plaçant cette cloche sur la planche, on tirait son orifice hors de l'eau de la cuve; car cet orifice étant assez large, l'eau tomberait et l'air pénétrerait dans l'éprouvette.

Cette cloche étant ainsi remplie d'eau et placée,

on engage au-dessous d'elle, par le trou *i*, l'extrémité d'un tube recourbé partant du ballon ou vase quelconque bien fermé dans lequel se produit le gaz qu'on veut recueillir. Quand une bulle de ce gaz arrive en *i*, elle doit monter dans l'éprouvette, en vertu de sa légèreté spécifique; c'est ce qu'elle fait en déplaçant et refoulant dans la cuve un volume d'eau égal au sien. Une série de bulles se succèdent de la sorte, et le niveau de l'eau s'abaisse dans l'éprouvette. Quand celle-ci contient à la fois du gaz et de l'eau, comme le montre la figure, le gaz est sous une pression inférieure à la pression atmosphérique; car cette pression qui le pousse par l'intermédiaire de la colonne d'eau qui est dans l'éprouvette, est diminuée par le poids de cette colonne, qui réagit contre elle; ce n'est donc pas une pression complète. Si la pression atmosphérique, au moment de l'opération, équivaut au poids d'une colonne d'eau de 103 décim., et que la colonne d'eau de l'éprouvette soit de 2 décim., l'air intérieur subit une pression de 101 seulement. Cette pression varie sans cesse, à mesure que les bulles se multiplient, et elle devient tout juste égale à une pression atmosphérique au moment où le niveau de l'eau dans l'éprouvette atteint celui de l'eau dans la cuve. Le gaz continuant à se dégager, le niveau dans l'éprouvette descend au-dessous de celui de la cuve, et il est clair qu'alors le gaz subit une pression supérieure à la pression normale, et que la différence en plus est égale à la différence des

deux niveaux. Quand l'éprouvette est entièrement pleine, le gaz se dégage au dehors, et l'on n'attend pas ce moment pour remplacer l'éprouvette par une autre qui soit remplie d'eau.

113. Si le ballon et le tube de dégagement communiquaient directement avec l'air, l'eau de la cuve prendrait son niveau au point *s*, mais, puisque les bulles de gaz enfilent le coude inférieur du tube, il en résulte qu'elles dépriment le niveau de toute la hauteur *vz*, et cette hauteur d'eau est la mesure de leur excès de pression sur la pression atmosphérique extérieure. La tension du gaz sera donc d'autant plus grande que le tube de dégagement sera plus enfoncé dans la cuve. Si donc il arrivait que l'élasticité du gaz fût trop faible pour qu'il pût atteindre le coude du tube, et de là passer dans l'éprouvette, on y remédierait en soulevant le tube, ou ôtant une couche d'eau de la cuve, pour en abaisser le niveau.

Si l'on suppose un tube en *s* adapté au col du ballon, à côté du tube de dégagement, et que dans ce tube on ait préalablement versé une certaine quantité de liquide, comme l'indique la figure, les deux colonnes seront nécessairement inégales, et la plus longue sera celle *gy*, qui communique avec l'air extérieur. De plus, la différence de hauteur *gh* sera justement égale à *vz*, dépression de l'eau dans le tube de dégagement. Cela résulte de ce qui précède ; puisque *vz* est la mesure de l'excès de tension du gaz sur la pression extérieure, il doit donc équilibrer dans le tube *g*B une

pression normale agissant en g, plus une colonne de liquide égale à vz. Quant aux deux portions hy, iy, elles s'équilibrent naturellement. Donc, on doit avoir $gh=vz$. D'où il suit que tant que les deux colonnes dans le tube gB resteront égales, il n'y aura pas de dégagement de gaz, et que lorsque celui-ci aura lieu, on suivra les progrès de sa tension sur celui de la colonne gy. De plus, cette colonne sera dans un état d'oscillation continuelle; car, à chaque nouvelle bulle de gaz qui se formera dans le ballon, il y aura condensation de la masse par l'addition de cette bulle à ce qui existe dans le même espace; donc il y aura augmentation de force élastique; donc surélévation de la colonne gy. Mais dès que la bulle aura enfilé jusqu'au bout le tube de dégagement et sera passée dans l'éprouvette, la masse du gaz intérieur ayant diminué d'autant, il y aura raréfaction, diminution d'élasticité, et enfin abaissement de la colonne gy. Ce double phénomène se renouvelant continuellement, il en résultera cette oscillation que nous voulions expliquer. On voit donc qu'en suivant de l'œil les faits qui se dessinent dans le tube en S, on suit par là même la marche et toutes les circonstances du dégagement de gaz qui a lieu dans le ballon.

Tubes de sûreté.

114. Toutefois, cet usage du tube en S est tout à fait secondaire. Son rôle principal est d'agir comme *tube de sûreté* en empêchant l'*absorption*.

Supposons que les réactions chimiques qui donnent naissance au gaz dans l'intérieur du bal-

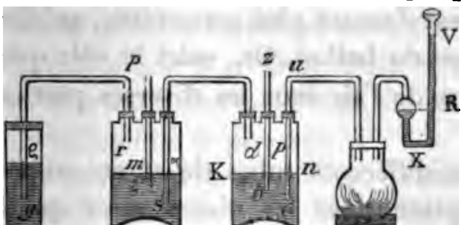
lon viennent à se ralentir par une cause quelconque, telle que l'épuisement, par exemple, et qu'il en résulte une diminution de tension, par suite de la diminution de température qui accompagne ce ralentissement, le gaz se contracterait sur lui-même dans le ballon, et la pression extérieure tendrait à faire monter l'eau de la cuvette dans le tube *z*L, et à l'introduire dans le ballon. Cette introduction commencée se continuerait rapidement à travers le gaz refroidi par l'eau de la cuve, et le ballon se remplirait de cette eau. C'est en cela que consiste le phénomène de l'absorption, qu'on évite avec le plus grand soin ; car son moindre inconvénient est de gâter le contenu du ballon, et son effet le plus ordinaire est de casser l'appareil. Or, le tube en S prévient immanquablement l'absorption ; car, à mesure que, par l'effet de la pression extérieure, l'eau monte dans *z*L, elle descend d'une égale quantité dans le tube *gy*, et la colonne *iy* est plus haute que *gy* d'une quantité égale à celle élevée dans le tube *z*L. Il arrivera donc que le sommet de la colonne *gy* descendra jusqu'en *y*, et un degré d'impulsion de plus l'amenant à l'entrée de *yi*, une bulle d'air montera dans cette branche et entrera dans le ballon. Le même phénomène se reproduira successivement d'instant en instant ; et l'air qui pénètrera de la sorte dans le ballon, augmentant la densité du gaz qui s'y trouve, s'opposera à la pression atmosphérique en *z* et à l'ascension ultérieure de l'eau de la cuve. Ainsi l'absorption

sera évitée. Mais il est facile de reconnaître que le succès de cette opération exige cette condition essentielle: que la partie *zL* du tube de dégagement qui s'élève au-dessus du niveau de la cuve soit plus longue que chacune des colonnes *xy*, lorsqu'elles sont de niveau; car c'est dans ce dernier cas que l'eau commence à monter en *z* et à descendre dans la branche *yg*. Or, si la branche *z*L est plus courte que *gy*, l'eau de la cuve aura atteint le point L, et passera dans le ballon avant que l'air ne soit arrivé au point *y*, pour passer à son tour dans le ballon. Ainsi l'absorption ne serait pas évitée.

Un simple tube droit d'un petit diamètre peut remplacer le tube en S comme tube de sûreté. Il suffit pour cela qu'il plonge dans la mixtion du vase B, et que celle-ci soit liquide. L'air rentrera par ce tube en déprimant la colonne liquide, qui s'y élèvera tant par la loi du niveau que par l'élasticité du gaz, et il faudra, comme ci-dessus, que la colonne à déprimer soit inférieure à *z*L, ce qui est très-facile à réaliser. Cependant, le tube en S est préféré dans la plupart des cas, parce qu'il n'exige pas que le ballon soit occupé par un liquide, qu'il ne donne pas issue, comme le tube droit, à un peu de gaz, qui se produit dans le ballon et qui est souvent à éviter; enfin, surtout, qu'on peut, par son moyen, introduire de temps en temps dans le ballon le réactif liquide dont l'action produit le gaz, et qu'on verse par l'entonnoir qui termine la branche *gy*.

115. Les tubes de sûreté jouent un rôle analogue, mais plus complexe, dans l'appareil de Woulf, dont on se sert pour saturer l'eau de certains gaz, et dont voici la description :

D'un ballon muni d'un tube de sûreté en S, et dans lequel a lieu la réaction qui produit le gaz qu'on veut dissoudre, part un tube de dégagement qui se rend en *o* dans l'eau d'un flacon à trois tubulures, où il plonge de la quantité *no*. Dans la tubulure intermédiaire est fixé un tube de sûreté droit *zb*, qui plonge de quelques millimètres seulement. De la troisième part un second tube de dégagement qui se rend dans un second flacon disposé de la même manière, c'est-à-dire qu'il reçoit trois tubes, comme le précédent. A la suite, peut se trouver un troisième flacon tubulé, et d'autres encore, jusqu'à une éprouvette qui reçoit le dernier tube de dégagement, lequel plonge dans un liquide capable d'absorber et de dissoudre le gaz parvenu jusque-là, après avoir échappé à l'action dissolvante de l'eau qu'il aurait traversée dans les flacons intermédiaires. En effet, partant du ballon, le gaz arrive par *uo* dans l'eau du premier flacon, et s'y dissout en partie ; ce qui échappe s'en va par le second tube de dégagement *das* dans l'eau du second flacon, et s'y dissout encore pour Appareil de Woulf.



11.

la plus grande partie. Ce qui échappe s'en va de même dans les flacons suivants, jusqu'à l'éprouvette, dont le liquide dissout les dernières bulles de gaz et les empêche de se répandre dans l'air. Quand la réaction est terminée, l'eau des différents flacons est plus ou moins imprégnée de gaz, et la solution est d'autant plus concentrée, qu'elle est plus voisine du ballon. Or, voici le rôle que joue la pression de l'air dans les diverses parties de l'appareil.

D'abord, les différents tubes de sûreté empêchent l'absorption dans les divers vases qu'ils protégent. Le tube en S en préserve le ballon, dont il interdit l'accès à l'eau du premier flacon, pourvu toutefois que la branche *ou* soit suffisamment longue, ainsi que nous l'avons exposé ci-dessus. Le tube *bz* empêche l'absorption de l'eau du deuxième flacon dans le premier; car, quand l'eau monte dans le second tube de dégagement, elle descend d'une égale quantité dans le premier tube droit. Le second tube droit préserve de la même manière le second flacon, et ainsi des autres, jusqu'au dernier, qui empêche l'ascension du liquide contenu dans l'éprouvette.

Mais, à partir de ce dernier vase, l'eau s'élève dans les divers tubes droits, et à des hauteurs d'autant plus grandes, que ces tubes approchent davantage du ballon. En effet, nous reconnaissons d'abord que le gaz qui se dissout dans le liquide de l'éprouvette, déprime ce liquide de toute la quantité *gy*; donc il a une tension supérieure à

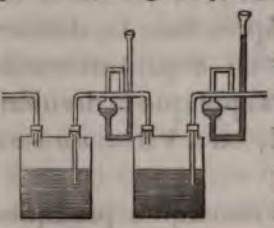
celle de l'atmosphère, que nous appellerons A, ou égale à cette pression A, plus au poids de la colonne *gy*. Or, comme un gaz a nécessairement la même tension partout dans l'espace qu'il occupe, telle est aussi celle du gaz dans le dernier flacon ; donc, la pression qui agit sur lui dans ce flacon par le tube de sûreté *tp*, est égale à A + *gy*; d'où il résulte que la colonne d'eau *mq*, soulevée dans ce tube au-dessus du niveau, est égale à *gy*, comme il s'agissait de le prouver.

Dans le flacon précédent, la tension du gaz est égale à celle que nous venons de considérer, plus au poids de la colonne d'eau *αs* que le gaz déprime pour entrer dans le dernier flacon ; elle est donc égale à A + *gy* + *αs*; donc la colonne soulevée dans le second tube droit *bz* est égale à *gy* + *αs*. On prouverait de même que, dans le troisième flacon, à partir de l'éprouvette, et où le tube de dégagement reçu enfoncerait de *no*, le liquide s'élèverait dans le tube de sûreté droit d'une quantité égale à *gy* + *αs* + *no*, et ainsi du reste ; de sorte qu'enfin la colonne du dernier tube de sûreté est égale à la somme de toutes les quantités dont enfoncent dans l'eau tous les tubes de dégagement qui viennent après lui. Le dernier tube de sûreté est le tube en S qui traverse le ballon ; c'est donc à lui que s'applique la dernière formule. Dans le cas actuel, on a VR = *uo* + *αs* + *gy*.

Il résulte de là quelques remarques pratiques importantes. Si les flacons sont nombreux, il faut

que les tubes de sûreté, surtout le tube en S, soient assez longs pour pouvoir contenir une colonne égale à la somme des enfoncements, et ceux-ci doivent être assez considérables pour que le gaz se dissolve bien en traversant une couche épaisse de liquide. Si tout celui qui est dans le tube en S ne pouvait pas former une colonne plus longue que cette somme, il passerait tout entier dans la branche XV, et le gaz s'échapperait par là. Quant aux tubes de sûreté droits, qu'on fait d'ailleurs d'un petit diamètre, on les enfonce peu, ce qui s'oppose d'autant plus efficacement à l'absorption. On reconnaît d'ailleurs que dans le système d'un grand nombre de flacons, la tension du gaz doit être fort considérable pour qu'il puisse se dégager même dans le premier flacon, puisque, dans le ballon où il se forme, l'excès de cette tension sur la pression atmosphérique a pour mesure RV, longueur assez considérable d'après ce qui précède.

Au lieu de flacons à trois tubulures, on en emploie qui n'ont que deux tubulures seulement ; et le tube de sûreté droit se trouve remplacé par une pièce analogue qui s'applique au tube de dégagement, comme on le voit ci-contre. Le jeu de ces tubes est facile à comprendre, d'après ce que nous venons de dire. C'est ce qu'on appelle les tubes de *Welter*.



CHAPITRE XI.

PHÉNOMÈNES D'ASPIRATION. — POMPES A LIQUIDES ET A GAZ. — MACHINES DE COMPRESSION.

116. Les phénomènes d'ascension des liquides dans des tubes, lorsqu'ils sont sollicités par aspiration naturelle, ou par le mouvement de pistons, sont des faits de raréfaction d'air, et ils sont entièrement régis par la loi de Mariotte. L'air et tous les gaz augmentent de force élastique en se condensant; ils diminuent de tension en se dilatant; et la force élastique est toujours réciproque au volume. Aspiration.

Lorsqu'on aspire dans un chalumeau ou dans un tube plongeant sous l'eau par son extrémité inférieure, on dilate la capacité de la poitrine et du tube réunis; l'air qui occupe cette capacité se dilate aussi et perd de sa force élastique; la pression extérieure prédomine, le liquide s'élève dans le tube, et l'air intérieur a une tension égale à 103 décimètres, moins la hauteur de la colonne d'eau soulevée. Dès qu'on cesse l'aspiration, l'air intérieur reprend son volume et son élasticité primitive, et l'eau retombe dans le réservoir. Veut-on enlever le tube sans que l'eau en tombe; alors il faut appliquer la langue à l'extrémité qui est dans la bouche, de manière à fermer le tube et y main-

tenir l'air qui s'y trouve entre l'eau et la langue, dans l'état de tension réduite où on l'a amené par l'aspiration. Dans cet état de choses, on peut enlever le tube sans que l'eau s'écoule; car rien n'est changé aux circonstances qui avaient amené l'ascension du liquide.

Pipette. C'est ainsi qu'on procède dans l'emploi des *pipettes*, petits chalumeaux de verre renflés en boule, et terminés par un bec long, très-fin et recourbé. Lorsqu'un liquide surnage à un précipité solide, ou que deux liquides surnagent l'un à l'autre, on les sépare en appliquant la pointe de la pipette au liquide supérieur, et aspirant par le sommet. Le liquide aspiré entre dans la pipette et s'accumule dans la boule; quand l'instrument paraît suffisamment plein, on l'enlève en y appliquant la langue, comme nous venons de le dire, et l'on évacue, d'une manière quelconque, le liquide emporté. On peut, par ce moyen, et en répétant convenablement l'opération, isoler très-bien les précipités chimiques, sans danger d'introduction de la matière solide dans le tube, à cause de la finesse de la pointe de la pipette.

Ventouses. 117. Les appareils chirurgicaux connus sous le nom de *ventouses*, sont une application immédiate des mêmes principes. Lorsqu'on veut faire dégorger le sang par une plaie, ou par une coupure quelconque, accidentelle ou artificiellement exécutée, on applique sur la peau, au-dessus de la coupure, un petit vase dans lequel on raréfie

l'air. On enflamme, à l'intérieur de ce petit vase, de l'étoupe ou du papier; l'air intérieur, porté à une haute température, se dilate et sort en grande partie du vase. Alors on l'applique sur la peau, et on le laisse refroidir. L'effet du refroidissement est de diminuer la force élastique de l'air intérieur; or, comme les gaz qui circulent sous la peau ont une tension égale à la pression atmosphérique, puisqu'ils sont assujettis à cette pression et en équilibre avec elle, ils se trouvent déchargés de plus en plus par la perte que subit l'élasticité de l'air renfermé sous la ventouse; ils font donc, pour sortir, un effort de réaction qui entraîne avec eux du sang et des humeurs. Du reste, la ventouse s'applique à la peau par l'effet de la pression extérieure, de manière à s'y enfoncer et à clore l'espace très-hermétiquement.

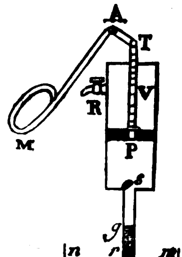
Au lieu de ventouses à feu, on emploie aujourd'hui des ventouses à pompe. Le vase étant appliqué à la peau, on fait le vide à l'intérieur, en faisant fonctionner une petite pompe qui le surmonte. Ce procédé est plus expéditif, plus commode et plus efficace que le précédent.

C'est un effet de ventouses que celui qui se produit sur les lèvres, quand une clef forée y reste suspendue par l'effet de la succion, qui a raréfié l'air à l'intérieur. Un effet pareil se produit lorsque après avoir introduit dans une éprouvette un gaz soluble dans l'eau, et appliqué la main à son orifice, on agite l'éprouvette avec un peu d'eau laissée dans son intérieur. Le gaz se

dissolvant, il ne reste au-dessus de l'eau que le vide, ou du gaz très-raréfié; alors l'éprouvette reste suspendue au plat de la main, parce qu'elle est soutenue par la pression atmosphérique que la très-faible tension du gaz intérieur est impuissante à balancer. Mais alors la main s'enfle violemment et pénètre dans l'éprouvette, le vide complet ou presque complet qui existe au-dessus de l'eau dans ce vase produisant un effet de ventouse aspirante.

Pompe aspirante.

118. Une des plus remarquables et des plus utiles applications du ressort de l'air modifié par la dilatation et la condensation, se rencontre dans les divers systèmes de pompes à liquides et à gaz. Occupons-nous d'abord des premières.



La pompe aspirante se compose essentiellement d'un cylindre creux ou corps de pompe fermé en bas par une cloison à soupape *s*, d'un piston qui se meut dans la longueur de ce cylindre, et enfin d'un tuyau d'aspiration placé au-dessous de la soupape, d'un diamètre beaucoup moindre que le corps de pompe, et plongeant dans l'eau d'un réservoir quelconque. L'air contenu d'abord dans le corps de pompe et le tuyau d'aspiration, est à l'état d'élasticité qui fait équilibre à l'air extérieur. Le piston est d'ailleurs percé d'une soupape qui s'ouvre en bas comme celle de la cloison.

L'appareil étant pris à l'état de repos, on abaisse

le piston jusqu'au bas du corps de pompe. L'air placé au-dessous se trouve condensé d'abord, et l'élasticité qu'il acquiert ainsi lui fait soulever, avec la soupape du piston, la pression atmosphérique normale qui pèse sur cette soupape. Par ce moyen, le piston fera sortir tout l'air contenu dans le corps de pompe au-dessous de lui. Lorsqu'il remontera, il emportera, en le poussant, tout l'air qui le surmonte, et il ne restera que le vide au-dessous; alors l'air contenu dans le tuyau d'aspiration soulèvera, par son élasticité, la soupape *s* du bas du corps de pompe, et se répandra dans ce corps de pompe vide, de telle sorte que sa tension soit uniforme dans les deux cylindres. Alors la soupape, n'étant plus poussée, se fermera par son propre poids. L'air, se trouvant dilaté dans les tuyaux, perdra son élasticité à proportion de son expansion, et ne pourra plus équilibrer la pression extérieure. Celle-ci prédominant, il en résultera l'ascension de l'eau dans le tuyau d'aspiration. Dès que le liquide sera arrivé à un point tel, que le poids de la colonne soulevée, plus la tension réduite de l'air des tuyaux (tension qu'augmente d'ailleurs l'ascension du liquide qui refoule cet air), feront équilibre à la pression extérieure, l'eau cessera de monter. Du reste, le mouvement ascendant du piston, l'invasion de l'air dans le corps de pompe, et l'ascension de la colonne liquide, se font simultanément, et ce n'est que lorsque la colonne ascendante s'arrête que la soupape *s* se ferme.

Un second coup de piston produira un effet semblable au précédent, en raréfiant l'air qui reste dans le tuyau d'aspiration; la colonne déjà soulevée montera plus haut, et après un nombre de coups de piston suffisant, l'eau atteindra le bas du corps de pompe et commencera à y pénétrer. Quand elle sera arrivée là, le piston descendant écrasera l'eau qu'il rencontrera par-dessous, et l'obligera à passer au-dessus de lui par la soupape; en remontant, il emportera avec lui une couche de liquide, et, à chaque nouveau coup, il ajoutera une nouvelle couche d'eau à celles qui auront déjà passé au-dessus de lui. Cette colonne supérieure au piston allant en croissant, finira par atteindre le déversoir R, par lequel elle s'écoulera en partie, et chaque coup de piston en fera désormais sortir une égale quantité.

On comprend que, lorsque le piston cessera de jouer, l'eau restera au-dessus de lui jusqu'au bord du déversoir, de sorte qu'elle coulera, dans la suite, au premier coup de piston. Cette remarque est importante : car, d'après la théorie qui précède, il semble qu'il faut toujours un certain nombre de coups de piston pour amener l'eau; or, on sait qu'en fait il en est tout autrement. C'est que dans les circonstances ordinaires, lorsqu'on met la main à la pompe, on trouve le piston déjà chargé jusqu'au déversoir, par les manœuvres précédentes; ce n'est que lorsqu'on fait fonctionner la pompe pour la première fois, qu'il faut donner un certain nombre de coups de piston pour ame-

ner l'eau. Toutefois, lorsque la pompe n'est pas très-bonne, l'eau de charge s'infiltre entre le piston et le corps de pompe, et quelquefois il n'en reste plus lorsqu'on veut faire fonctionner l'appareil.

Cette théorie se complique par les importantes considérations que voici :

1° D'abord il ne faut donner au tuyau d'aspiration qu'une longueur moindre que 10 mètres; car une fois cette hauteur atteinte, la colonne soulevée fait équilibre, par son poids, à la pression extérieure; et même, si le baromètre était fort bas, l'atmosphère ne soutiendrait pas tout à fait 10 mètres d'eau. La pression extérieure serait donc impuissante à élever davantage la colonne. Cette longueur de 10 mètres est même encore trop grande, si l'on considère les imperfections de fait de ces sortes de machines; si les jonctions ne sont pas parfaites, les chambres d'air raréfié ne sont pas privées absolument de toute communication avec l'air extérieur; et l'air, moins raréfié qu'il ne devrait l'être, exerce une contre-pression plus considérable qu'on ne le suppose dans la théorie. Limite de la hauteur.

Si, dans sa position supérieure, le piston est éloigné de la surface du réservoir de plus de 10 mètres, l'eau s'élèvera seulement jusqu'à cette hauteur moyenne dans le corps de pompe, et il restera, entre le sommet de cette colonne et le piston, un espace véritablement vide. Cet espace pourra aller s'agrandissant, si le réservoir n'est

pas très-large; car, dans ce cas, le niveau du liquide s'abaissera dans le réservoir à mesure qu'il en montera dans les cylindres; et si le pied de la colonne descend de plus en plus, il en sera nécessairement de même de son sommet. Cette dépression éventuelle du niveau dans le réservoir est encore un motif grave pour se tenir, en ce qui concerne la longueur du tuyau d'aspiration, notablement au-dessous de la limite, c'est-à-dire, de 10 mètres.

tendue de la course du piston.

2° Il ne faut pas croire que cette condition étant d'ailleurs remplie, la pompe aspirante doive produire immanquablement son effet. Nous avons supposé, dans ce qui précède, que le piston descendait à chaque coup jusqu'au bas du corps de pompe. Le contraire peut avoir lieu; mais cela compromet le jeu de la machine, comme on va le voir.

Appelons H la longueur du corps de pompe, depuis sa base jusqu'à la position supérieure du piston, et A la pression atmosphérique équivalente à $10^m,3$ d'eau. Supposons que la course du piston, au lieu d'être égale à H tout entière, comme cela aurait lieu si le piston s'abattait jusqu'au bas du corps de pompe, ne soit qu'une fraction de cette longueur, $\frac{5}{6}$ de H, par exemple. Je dis que l'ascension de l'eau s'arrêtera quand la colonne aura atteint la longueur, $\frac{5}{6}$ de A, ou $8^m,58$. En effet, quand la colonne pèsera $\frac{5}{6}$ de A, la réaction élastique de l'air intérieur sera égale à ce qui manque pour faire A tout entier, ou à $\frac{1}{6}$ de A. Le

piston ne parcourant que les $\frac{5}{6}$ de H, réduira donc l'air qu'il comprime au sixième restant de ce volume H; donc cet air, qui avait pour tension $\frac{1}{6}$ de A, étant condensé comme 6, deviendra en tension précisément égal à A. Donc cette tension étant tout juste égale à celle qui presse extérieurement sur la soupape du piston, elle ne pourra soulever cette soupape, et l'air, refoulé par le piston, ne pourra pas s'échapper. Le piston remontant, cet air reprendra son volume H et son élasticité $\frac{1}{6}$ A; c'est-à-dire que les choses se retrouveront dans le même état que d'abord; donc, à partir de ce moment, tous les coups de piston demeureront stériles. On reconnaît qu'en général, quand le piston ne parcourra qu'une fraction $\frac{m}{n}$ du corps de pompe, la colonne d'eau soulevée n'atteindra que $\frac{m}{n}$ de $10^{m},3$. Si le piston n'a qu'une course d'un quart, la colonne ascendante ne saurait dépasser $2^{m},60$. Donc si le tuyau d'aspiration est plus long que $\frac{m}{n}$ de $10^{m},3$, l'eau n'atteindra pas le corps de pompe, et la machine ne jouera pas.

Charge du piston.

3° En général, le jeu d'une pompe aspirante est dur pour le bras qui la fait fonctionner. Cela vient de ce que le piston supporte toujours une charge considérable, charge qui va même en croissant, à mesure que la pompe fonctionne davantage. Supposons, en effet, que la colonne d'eau ait déjà atteint une certaine hauteur, 8 mètres, par exemple : la réaction élastique de l'air des cylindres est donc nécessairement égale à $10^{m},3$, moins 8, ou à $2^{m},3$. Or, cette réaction qui agit à l'intérieur dans

tous les sens, pousse le piston de bas en haut; ce piston est donc repoussé dans ce sens comme 2^{m},3, tandis qu'il est pressé de haut en bas par une atmosphère complète, ou 10^{m},3. Donc l'excès de la pression qu'il subit de haut en bas, ou la différence de ces deux valeurs, sera 8 mètres. Ce raisonnement, qu'il est facile de généraliser, établit ce fait remarquable, que, dans le jeu de la pompe aspirante, le piston supporte une charge précisément égale au poids d'une colonne d'eau qui aurait le piston pour base, et pour hauteur celle de la colonne d'eau déjà soulevée.

Cette formule comprend même le cas où l'eau aurait déjà passé au-dessus du piston; car, jusqu'au piston même, le raisonnement ci-dessus s'applique; et il est bien évident que l'eau qui va se loger au-dessus du piston ajoute au poids qui le presse, dans le rapport des diverses hauteurs de cette couche.

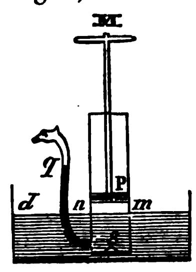
Il résulte de là, qu'il faut appliquer au piston, pour le faire jouer, une puissance très-considérable, et surtout employer un levier très-énergique; c'est ce que réalisent les lourds et longs leviers au moyen desquels on manœuvre ordinairement ces pompes. Le calcul de la charge est d'ailleurs facile : soient 8 mètres la longueur du tuyau d'aspiration, et 16 centimètres le diamètre du piston. La surface en sera de 201 centimètres carrés, dont chacun sera pressé par 8 mètres ou 800 centimètres de hauteur; ce qui donne 800 centimètres cubes et 800 grammes en poids. Le poids

total sera donc 201 × 800 = 160800 grammes ou 320 livres de charge. A cela il faudra ajouter l'eau supérieure au piston. Soit le déversoir à 2 mètres au-dessus du bas du corps de pompe; il faudra ajouter le poids d'une colonne de 2 mètres; ce qui conduit à une charge totale de 400 livres.

Produit de la pompe.

Le produit d'une pompe aspirante peut s'évaluer aisément par le calcul, au moyen de ses dimensions. Si la surface du piston est de 2 décimètres carrés, et la longueur de sa course, 25 centimètres, il portera au déversoir, à chaque coup, un volume d'eau de 2 × 2,5 = 5 décimètres cubes, ou 5 litres. Et si l'on peut donner 2 coups de piston en 3 secondes, on trouvera 40 coups, ou 200 litres fournis dans l'espace d'une heure. On reconnaît qu'une fois que l'eau a traversé le piston, elle peut être élevée à une hauteur quelconque; il suffit de lui appliquer pour cela une force suffisante; mais on est forcément limité par la fatigue qu'éprouveraient les pièces de la machine.

On peut aussi calculer de combien l'eau s'élève dans les cylindres à chaque coup de piston. Mais ce calcul, qui conduit à une équation du second degré, est sans utilité réelle.



Pompe foulante.

119. La *pompe foulante* n'a ni tuyau d'aspiration, ni soupape dans son piston. Le corps de pompe plonge dans le réservoir, et l'eau monte à l'intérieur au niveau de ce réservoir, en soulevant une soupape qui en garnit le fond, comme

dans la pompe aspirante. Souvent, au lieu de cette soupape, le fond du corps de pompe est percé de petits trous comme une pomme d'arrosoir, trous par lesquels l'eau s'élève en *mn*, en vertu de la loi du niveau. Au bas du corps de pompe, est un tuyau latéral à soupape.

Lorsque le piston s'abaisse, il refoule l'eau dans le tube latéral, ainsi que l'air, s'il y en avait entre l'eau et le piston qui la pousse devant lui. Si le fond est à soupape, on comprend que l'eau poussée ne peut rentrer dans le réservoir; s'il n'est que percé de trous, l'impulsion du piston, plus considérable que la vitesse avec laquelle l'eau pourrait fuir, fait passer une grande partie du liquide dans le tube latéral. Là, il s'élève à proportion de la largeur du piston, de l'étendue de sa course et de l'étroitesse du tube. Quand le piston cesse de pousser, la soupape latérale se ferme par son propre poids et soutient la colonne déjà soulevée. Le piston remonte, et l'eau du réservoir le suit, par la loi du niveau; un second coup de piston fait entrer dans le tube latéral une seconde colonne de liquide, et celui-ci ne tarde pas à atteindre le déversoir. Dès ce moment, chaque coup de piston produit un écoulement ou un jet.

On peut aisément calculer la hauteur à laquelle chaque coup de piston élève la colonne d'eau. Soit D le diamètre du piston, l la longueur de sa course, d le diamètre du cylindre que nous supposerons uniforme, et h la hauteur inconnue à laquelle un coup de piston doit élever l'eau; il est

évident que le cylindre d'eau poussé par le piston est équivalent à celui qui se moule dans le tube latéral; d'où l'égalité... $\pi D^2 l = \pi d^2 h$...ou $D^2 l = d^2 h$; d'où $h = \frac{D^2 l}{d^2}$. Soit par exemple $D = 0^m,15$ ...$d = 0^m,03$...$l = 0^m,22$... il vient...$h = 5^m,50$; c'est-à-dire que chaque coup de piston élèverait de cinq mètres et demi la colonne d'eau. Si chaque coup de piston dure une seconde, le nombre $5^m,50$ sera l'expression de la vitesse imprimée à l'eau ascendante, ou, ce qui revient au même, la vitesse du *jet*, si le tuyau latéral étant plus court, la colonne poussée par le piston s'élance au dehors. Du reste, le calcul de la dépense est facile à faire.

Charge du piston.

Dans son mouvement descendant, le piston est repoussé par une force considérable, pour vaincre laquelle il est nécessaire de lui appliquer une puissance énergique. La résistance va croissant à mesure que le piston s'abaisse, parce que la colonne ascendante dont le poids le repousse, devient progressivement plus considérable. Prenons le piston au bas de sa course, et un instant avant que la soupape latérale se ferme. Il se trouve entre deux pressions atmosphériques, l'une supérieure, l'autre agissant de bas en haut, par l'intermédiaire de la colonne liquide sur le sommet de laquelle elle pèse. Il faut remarquer d'abord que ces pressions sont égales; car la loi connue sous le nom de paradoxe hydrostatique s'applique à la pression de l'air comme à celle de l'eau. Or, ici les bases respectives des deux colonnes d'air sont

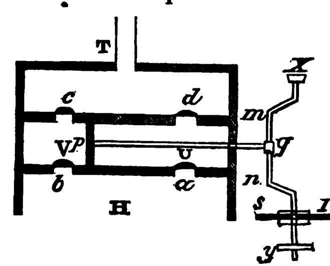
les deux surfaces égales du piston, et leur hauteur est évidemment la même; donc les deux pressions atmosphériques se neutralisent. Mais il reste le poids de la colonne d'eau soulevée, colonne dont il faut compter la hauteur verticale à partir de la base inférieure du piston; or, cette pression est équivalente au poids d'une colonne qui aurait pour hauteur cette colonne, et pour base celle du piston lui-même. On voit donc qu'ici la formule de pression est la même que dans le cas de la pompe aspirante; c'est le poids de la colonne d'eau déjà soulevée, mais colonne ayant pour base celle du piston; seulement ce poids réagit de bas en haut, au lieu d'agir de haut en bas, comme dans le cas qui précède.

Pompe aspirante et foulante.

120. La pompe aspirante et foulante tout à la fois, est une combinaison très-simple des deux appareils que nous venons de décrire. Elle a de la pompe aspirante le tuyau d'aspiration, et de la pompe foulante, le tuyau latéral à soupape. Son piston n'est pas percé; la soupape en est remplacée par celle du tuyau latéral; l'eau et l'air qui traversent le piston dans la pompe aspirante, sont ici poussés dans le tuyau dont il s'agit, et l'on peut dire, qu'avec ce simple changement de *forme*, c'est le jeu de la pompe aspirante, et qu'elle est assujettie aux mêmes conditions d'efficacité. Seulement le calcul de la charge du piston est complexe, cette charge tenant à la fois de celles des deux pompes qu'elle résume. Lorsque le piston

refoule dans le tube latéral l'eau qui est parvenue dans le corps de pompe, il subit de bas en haut la réaction de la colonne soulevée dans ce tube, comme dans la pompe foulante. Au contraire, pendant le mouvement ascendant du piston, celui-ci subit la même pression que dans la pompe aspirante, c'est-à-dire le poids d'une colonne d'eau d'une hauteur égale à celle déjà soulevée dans le tuyau d'aspiration et le corps de pompe lui-même. D'ailleurs, les calculs de dépenses sont aussi les mêmes que dans les cas précédents, et la vitesse du jet latéral se détermine aussi comme dans le jeu de la pompe foulante.

121. Le jeu de la pompe aspirante et foulante trouve une application remarquable dans le système de lampes dites de *Carcel*.



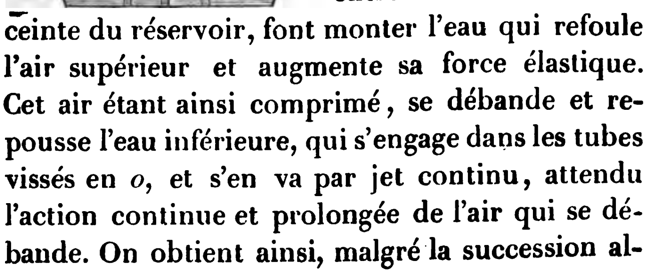
Dans le pied de ces lampes se trouve le réservoir d'huile H, et au-dessus est établi un corps de pompe horizontal dans lequel joue le piston *p*. Ce corps de pompe porte quatre soupapes *a*, *b*, *c*, *d*, s'ouvrant de bas en haut. Quand le piston marche dans le sens *pq*, il fait un vide absolu ou relatif en *p*V, et dès lors la pression atmosphérique qui agit sur l'huile la fait entrer dans la capacité *p*V, en soulevant la soupape *b*. Lorsque le piston revient vers V, cette huile est refoulée vers la soupape *c*, qu'elle soulève, et passe dans le récipient supérieur *cd*. Le même Lampe Carcel.

effet est produit du côté *p*U, du piston; l'huile passe par les deux soupapes *a*, *d*, dans le récipient *cd*. Une fois celui-ci plein, chaque mouvement du piston refoule l'huile dans le tube vertical qui se termine par le bec dans lequel plonge la mèche. Or, on reconnaît que par ce mécanisme il entre à chaque coup de piston une même quantité d'huile dans le tube, et qu'une même s'élève jusqu'à l'orifice du bec, pour remplacer le liquide consommé par la combustion. Ainsi la mèche sera toujours fournie d'huile, et le sera avec une régularité parfaite, si le mouvement du piston est lui-même régulier. Or, le piston est mû par une manivelle *xmny*, que fait tourner un mouvement d'horlogerie, ce qui donne à la rotation toute l'uniformité désirable. Tout l'appareil est contenu dans le pied de la lampe; celui-ci est percé latéralement, comme les cadrans d'horloge, d'un trou qui sert à remonter le moteur, avec une clef semblable à celle des pendules. Les lampes *Carcel* sont précieuses par la régularité de leur marche; mais la complication et la délicatesse de leur mécanisme en élèvent trop le prix pour qu'elles puissent être d'un emploi très-commun.

Seringue. 122. Une seringue du système le plus simple, est un appareil qui participe de la pompe aspirante et de la pompe foulante tout à la fois. Le piston est plein, et son mouvement ascendant qui fait le vide, provoque l'ascension de l'eau du réservoir; le mouvement descendant repousse l'eau par la

même voie. Mais ces instruments diffèrent essentiellement des véritables pompes, par l'absence de la cloison à soupape. Si, dans une pompe aspirante ordinaire, cette cloison n'existait pas, l'eau élevée au-dessus du réservoir redescendrait au niveau quand le piston s'abaisserait, et la machine ne fonctionnerait pas. L'appareil dont il est ici question, et qui, dans son état de plus grande simplicité, remonte aux temps héroïques, a reçu depuis le commencement du siècle actuel des modifications importantes, dont quelques-unes le font rentrer dans la classe des véritables pompes.

123. Les *pompes à incendie* sont une application importante de la théorie qui précède : ce sont des pompes foulantes à double piston et à jet continu; mais pour obtenir ce dernier résultat, on a fait intervenir, d'une façon particulière, la tension de l'air comprimé. Au milieu de l'eau du réservoir est placée une cloche qui contient de l'air, et dans laquelle les deux pistons qui jouent alternativement entre la cloche et l'enceinte du réservoir, font monter l'eau qui refoule l'air supérieur et augmente sa force élastique. Cet air étant ainsi comprimé, se débande et repousse l'eau inférieure, qui s'engage dans les tubes vissés en *o*, et s'en va par jet continu, attendu l'action continue et prolongée de l'air qui se débande. On obtient ainsi, malgré la succession al- Pompes à incendie.



ternative des coups de piston, un écoulement ou plutôt un jet d'eau sans intermittence. Il est facile de calculer, comme ci-dessus, le produit, la longueur et la vitesse des jets. On remarquera que les pressions atmosphériques s'élident mutuellement sur les pistons conjugués; mais ceux-ci, dans leur mouvement d'impulsion contre l'eau, ont à vaincre la réaction élastique de l'air de la cloche, plus, le poids de la couche d'eau qui fait la différence des niveaux. La hauteur du jet dépend de la tension de l'air intérieur, celle-ci du volume d'eau introduit, et ce volume dépend de la surface et de l'étendue de la course du piston. C'est donc en définitive celui-ci qui règle les conditions du jet. Mais on comprend que plus le piston est large, plus doit être énergique la force qui le met en jeu, et qu'on fait d'ailleurs agir par un levier considérable.

124. Il y a beaucoup d'autres appareils de pompes qui ne diffèrent les unes des autres que par le mécanisme, mais où la pression de l'air agit toujours comme moteur, et se trouve continuellement modifiée par les variations du volume.

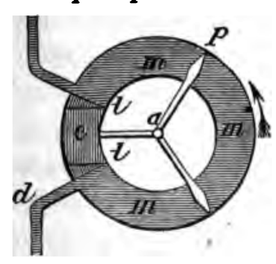
Pompe des prêtres.

Nous signalerons d'abord la *pompe des prêtres*, où le piston est remplacé par un cuir fixé au corps de pompe qu'il ferme hermétiquement. La tige *ta* appliquée au milieu de ce disque, le tire et le tend de manière à lui donner la forme d'un cône creux *man*, puis dans son mouvement descendant, en fait un cône creux ren-

versé *mdn*. Dans le premier de ces mouvements, l'air inférieur est dilaté de tout le volume du cône; dans le second, il est condensé d'autant. L'air condensé soulève une soupape *x* et passe au-dessus du diaphragme, puis dans la position *man* de celui-ci, il y a dilatation, et diminution d'élasticité; d'où ascension de l'eau par le tuyau inférieur. Une série de pareils coups de piston amène l'eau jusqu'au diaphragme, et cette eau passe au-dessus par le même mécanisme. On reconnaît qu'ici le bas du corps de pompe doit être situé à moins de 10 mètres de hauteur au-dessus du niveau. Les conditions de course et de charge sont d'ailleurs les mêmes que dans la pompe aspirante; mais l'effet est nécessairement peu considérable dans un temps donné. C'est l'espèce de calotte que forme le diaphragme mobile, qui a fait donner son nom à cette sorte de pompe.


Pompe américaine.

125. La pompe *américaine*, ou de *Farcot*, est une pompe rotative qui n'a pas de piston proprement dit. Une manivelle fait tourner un axe dans lequel sont encastrées des palettes *ap*, et le mouvement s'exécute entre deux tambours, dont les palettes divisent l'intervalle en cloisons angulaires parfaitement fermées. Entre les deux tuyaux d'aspiration *d*, et de refoulement *m*, l'intervalle des deux tambours est occupé par une cloison épaisse C, divisée par une fente étroite, dont le

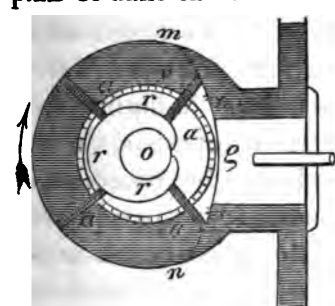


jour est égal à l'épaisseur des palettes. Quand on fait tourner celles-ci avec le tambour intérieur, chaque palette va heurter contre la cloison, qui l'arrêterait par son plat, si un petit obstacle contre lequel elle butte ne lui faisait faire un quart de conversion, de manière à ce qu'elle se présente à la cloison par sa tranche. Là, elle traverse la fente qu'elle bouche, et la palette suivante en fait autant après elle. Les distances et les largeurs des palettes sont calculées de telle sorte, que la fente se trouve toujours traversée et bouchée. Quand la palette sort de la cloison en t', elle se retourne pour se placer en travers du tambour et reconstituer une chambre; or, par l'effet de ce retournement et du mouvement qui le suit, la palette forme derrière elle *un vide*, dans lequel se précipite l'eau du tube d'aspiration. La palette suivante pousse cette eau devant elle, et l'amène au tube de retournement où cette eau s'engage, puisque la cloison épaisse lui fermant toute issue, elle ne peut céder à l'impulsion de la palette que par cette seule voie. Chaque palette fera donc monter dans le tuyau de refoulement une colonne liquide. Avant que l'eau du réservoir arrivât au sommet du tube d'aspiration, l'air qui remplissait ce tube se précipitait dans le vide formé entre les palettes, et était entraîné par elles jusqu'au tuyau de refoulement par lequel il était chassé. On reconnaît encore ici que le premier de ces tubes doit être inférieur à 10 mètres; et que dès que l'eau a pénétré entre les tambours, on peut l'éle-

ver dans le tube de refoulement à une hauteur quelconque, il ne s'agit que d'appliquer à la manivelle une force suffisante; car la colonne du tuyau de refoulement pèse contre les palettes. On reconnaît aussi qu'elles supportent une pression qui croît avec la hauteur de celle qui occupe le tuyau d'aspiration, de telle sorte que la formule de la charge serait la même que pour la pompe aspirante à piston, si les palettes ne subissaient la pression d'une manière oblique et continuellement variable.

Pompe de Dietz.

126. La pompe de Dietz est aussi une machine rotative, dans laquelle l'eau s'élève sans piston par le vide que forment derrière elles des palettes mobiles. Elle se compose, comme la précédente, d'une boîte annulaire, que parcourt en tournant l'eau qui passe d'un tube d'aspiration dans un tube de refoulement. Dans l'intérieur de cette boîte, tourne, au moyen d'une manivelle, l'anneau *aaa*, garni de palettes qui peuvent se mouvoir dans leur plan et dans la direction des rayons. Une cloison



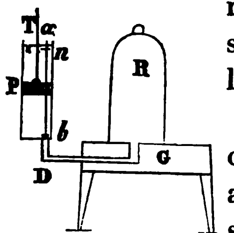
courbe *mgn*, percée de deux soupapes en *x* et *z*, est placée tangentiellement à l'anneau mobile, de telle sorte que lorsque les palettes arrivent vers cette cloison, elles se trouvent, par défaut d'espace, repoussées dans l'intérieur de l'anneau, comme on le voit en *u* et en *v*. Dans cet

intérieur elles sont retenues par un ressort *rrr*, qui les repousse dès qu'elles cessent de butter contre la cloison. Lorsqu'elles arrivent en *g*, elles sont entièrement refoulées dans l'intérieur de l'anneau, dont elles commencent à sortir dès qu'elles ont dépassé ce point; or, alors elles laissent derrière elles un *vide*, dans lequel affluent par le trou *z*, l'air et ensuite l'eau du tuyau d'aspiration. La palette suivante pousse cette eau dans toute l'étendue de l'espace annulaire, jusque devant le trou *x*, par lequel elle la fait passer dans le tuyau de refoulement. Sauf une modification avantageuse du mécanisme de détail, le système de cette pompe rentre dans celui de la précédente, et donne lieu aux mêmes observations en ce qui concerne la charge. Du reste, les manivelles de ces deux machines sont pourvues de volants.

127. Il nous reste à faire une remarque sur l'effet des longs tuyaux de cuir qu'on emploie comme tubes d'aspiration, en les faisant plonger au loin dans un bassin, à partir duquel ils courent horizontalement sur le sol. La longueur de ces tubes horizontaux est sans influence sur la hauteur à laquelle on peut élever le liquide dans la pompe employée, mais cette longueur, ou plutôt leur volume influe sur le nombre de coups de piston nécessaire pour amener l'eau, puisque l'air qui les remplit n'est épuisé qu'après un grand nombre de ces coups.

Machine pneumatique. 128. Les pompes précédentes sont des pompes à gaz aussi bien qu'à eau, puisque avant de faire

monter celle-ci, on fait le vide ou l'on raréfie l'air, et l'on pourrait, par ce mécanisme, faire le vide dans un récipient quelconque, ou y raréfier l'air indéfiniment. La machine pneumatique, qui est spécialement affectée à ce genre de service, n'en diffère que par une disposition de ses pièces, qui en rend la manœuvre plus facile.



Admettons d'abord un corps de pompe aspirante ordinaire, avec la cloison et le piston à soupape, et un tuyau d'aspiration qui, au lieu d'être vertical, est recourbé pour traverser une table au-dessus de laquelle il débouche en G. Sur cette table, on applique un récipient de verre qui renferme l'air qu'il s'agit d'épuiser, et qui remplace le réservoir d'eau. Il est manifeste que si l'on fait jouer le piston comme dans les pompes précédentes, on le raréfiera, en le chassant par parties au-dessus du piston, à travers la soupape. Et comme, d'ailleurs, l'air non encore enlevé se répand uniformément dans le récipient et le corps de pompe, et que le piston ne vide que celui-ci, il en résulte évidemment que l'air du récipient ne peut être qu'indéfiniment raréfié, mais qu'il ne saurait être épuisé. On calcule théoriquement les portions d'air enlevées et restantes; mais celles-ci sont d'ailleurs indiquées par la hauteur du baromètre qui communique avec le récipient. Supposons que la pression extérieure soit de 762 millimètres, et celle de l'inté-

rieur du récipient de 35 millimètres seulement, la tension y sera seulement de $\frac{35}{762}$; donc aussi la masse actuelle ne sera que $\frac{35}{762}$ ou $\frac{1}{22}$ environ de la quantité primitive.

On sait que la soupape du bas du corps de pompe est remplacée par un petit bouchon que le piston lui-même fait mouvoir par l'intermédiaire d'une tige qui le traverse. Dès que le piston commence à monter, il emporte avec lui la tige et soulève le bouchon; mais il le soulève très-peu, à cause d'un bourrelet qui existe au sommet de la tige, et par le moyen duquel celle-ci butte contre la fermeture du corps de pompe : la tige étant ainsi arrêtée, le piston glisse contre elle, et le petit bouchon reste tout près de l'ouverture qu'il est destiné à fermer. Aussi, dès que le piston commence son mouvement descendant, le bouchon s'applique contre cet orifice et le ferme, parce que le piston entraîne la tige, contre laquelle il glisse encore dès que l'arrêt du bas du corps de pompe met obstacle à une progression ultérieure de celle-ci. Quand l'air était déjà très-raréfié dans les anciennes machines, il n'avait plus assez de tension dans le récipient pour pouvoir soulever la soupape du corps de pompe, et le jeu de la machine devenait inefficace : cet inconvénient n'existe pas avec le système du petit bouchon.

On sait aussi que les machines actuelles se composent de deux corps de pompe; que les tiges des deux pistons sont à crémaillères, qu'elles communiquent et sont mises en mouvement alternatif

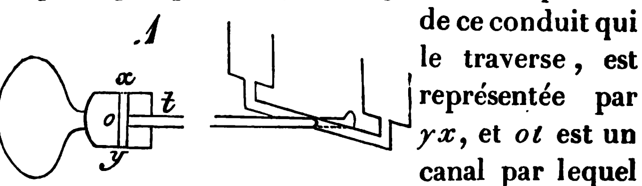
par une roue dentée que fait mouvoir un levier. De cette sorte, les pressions qui agissent extérieurement sur les deux pistons sont égales, et se faisant équilibre, du moins à peu près, les pistons n'ont d'autre résistance à vaincre, pour monter, que le frottement dans leurs cylindres. Toutefois, les deux pressions extérieures ne sont pas rigoureusement égales, parce qu'elles subissent des réactions inégales de la part des portions d'air qui sont au-dessous des pistons; car ceux-ci étant en général à des hauteurs différentes, les airs inférieurs sont inégalement condensés, et, par conséquent, sont d'élasticités inégales.

129. Nous avons dit qu'il était dans la nature de la machine de ne faire que raréfier l'air progressivement et indéfiniment, sans parvenir à l'épuiser; mais, de plus, il arrive que, parvenu à un certain terme assez petit de cette progression, la machine ne peut pas fonctionner davantage. Ainsi, dans les bonnes machines, le baromètre ne descend guère qu'à 2 millimètres; ce qui prouve que les pistons ne raréfient plus l'air. Cela tient à ce qu'à ce degré, le gaz est raréfié à tel point, que, même après la condensation par le mouvement descendant du piston au-dessous duquel il reste logé, il n'a pas assez de tension pour soulever la soupape du piston avec la colonne atmosphérique qui le presse. Cet effet commence évidemment lorsque l'air, ainsi condensé par le piston, acquiert une force élastique justement égale à la somme d'une atmosphère, plus la résistance de la sou-

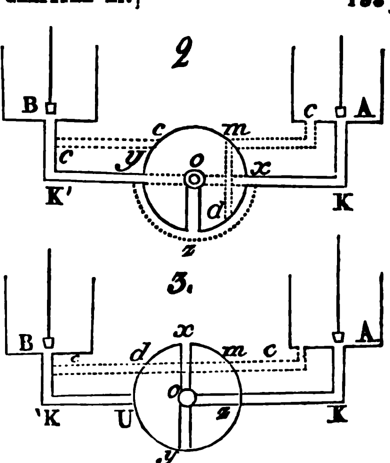
pape. Dès ce moment, celle-ci ne joue plus, et les mouvements du piston n'ont pour effet que des dilatations et des condensations alternatives du peu d'air qui reste, mais sans aucune évacuation du fluide.

On remédie à cet état de choses, et l'on pousse la raréfaction à un tel degré, que la hauteur barométrique, dans le récipient, est sensiblement nulle, au moyen de la machine à double épüisement dont nous allons exposer le système.

Machine à double épuisement. Le robinet qui, dans les machines ordinaires, joue transversalement dans le tuyau d'aspiration, a son axe disposé dans le sens de celui de ce tuyau, et traverse le conduit qui réunit les deux corps de pompe au tuyau d'aspiration. La portion de ce conduit qui le traverse, est représentée par *yx*, et *ot* est un canal par lequel ce conduit communique avec le tuyau d'aspiration qui est le prolongement de *ot*. Perpendiculairement au canal *ox*, et au-dessous du plan de notre figure, est un troisième canal dans le sens et de la longueur du rayon; ce troisième canal *oz*, et le conduit *xy*, sont vus dans leur plan commun, figure 2. On les voit encore dans ce plan, fig. 3, mais après qu'on a fait faire au robinet un quart de révolution. Dans cette seconde position du robinet, un petit tuyau de communication *ccc* réunit les deux corps de pompe, en traversant le



robinet suivant une corde *md*, tandis que dans la première position, la partie *md* de ce canal est placée verticalement, de sorte que la communication entre les deux corps de pompe est interrompue. Tel est l'état de choses tant qu'on fait manœuvrer la machine selon le système ordinaire. Il n'y a pas de communication entre les deux pompes, et toutes deux communiquent au récipient par le tube K*o*K′, du milieu duquel *o* part le tube d'aspiration qu'on voit ici de face, suivant une section transversale *o*, et qu'on voit fig. 1, suivant une coupe de profil *ot*.



Supposons la raréfaction de l'air du récipient amenée au degré ordinaire, à 2 millimètres, par exemple, niveau que ne peuvent faire varier les coups de piston subséquents ; on fera faire au robinet un quart de conversion, ce qui le fera passer de l'état fig. 2 à la position fig. 3. En examinant cette dernière figure, on remarque que la communication est établie entre les deux corps de pompe, par le conduit *cmdc;* que le corps de pompe A communique avec le récipient par le conduit K*o*, qui se recourbe en *o*, perpendiculairement au plan de notre figure, et devient le tuyau

d'aspiration; enfin, que toute communication est interrompue entre le corps de pompe B et le récipient; car la portion du conduit K'U, qui, précédemment, se continuait vers le récipient à travers le robinet selon *yo*, présente maintenant une impasse dont la convexité pleine du robinet forme le fond. Or, alors si le piston de A est amené au fond de son corps de pompe, où il tient le peu d'air qui reste à une tension justement égale à une pression atmosphérique que nous désignerons par la lettre β, le piston B monte, et le peu d'air qui restait dans ce corps de pompe y est considérablement dilaté; de sorte que si l'on appelle p le volume très-petit qu'il occupait quand le piston B était en bas, et P la capacité du corps de pompe, sa tension sera $\frac{p}{P}$ β. Supposons, par exemple, que p soit 8 millimètres cubes, et P 960 centimètres ou 960000 millimètres cubes, il est clair que cet air, qui, dans son état réduit, a une tension sensiblement égale à β, n'aura, en se dilatant ainsi, que les $\frac{8}{960000}$ de cette tension.

Mais puisque la communication se trouve établie entre les deux corps de pompe, les deux airs qui ont des tensions si différentes vont se mêler; l'air de A, qui a la tension β, va se précipiter dans le corps de pompe B, et il n'en restera, sous le piston A, qu'une quantité qui sera à celle que reçoit B :: p : P $= \frac{p}{P}$ B, ou $\frac{8}{960000} = \frac{1}{120000}$ de B, en prenant les chiffres de l'exemple ci-dessus. La tension de l'air en A deviendra donc 120000 fois moindre, tandis que celle de l'air en B sera sensiblement

doublée, puisqu'il contiendra sensiblement deux airs qui occupaient chacun l'espace p. Quand le piston A remonte, le peu d'air déjà très-raréfié qui se trouve sous lui se raréfie encore, et il en afflue une nouvelle quantité venant du récipient. Le piston A, en redescendant, refoule encore celui-ci dans le corps de pompe B, qui contiendra ainsi de l'air à un état de tension $= 3\frac{p}{P}\beta$. On peut continuer indéfiniment de la sorte; et il est clair que par cette introduction continue de l'air du récipient dans B, d'où il résulte une augmentation continue de force élastique, cet air en aura bientôt assez pour soulever la soupape du piston B, quand celui-ci sera au point le plus bas : ainsi, une nouvelle portion de l'air du récipient sera rejetée à l'extérieur. Au commencement de cette manœuvre, la soupape de B est soulevée dès le second coup de piston, puisque la tension de l'air inférieur devient immédiatement double, et que nous l'avons supposée $= \beta$ tout juste, ou à très-peu près ce qu'il fallait pour soulever la soupape. A mesure que l'opération continue, les sorties de l'air ont lieu par la soupape de B, à chaque coup de piston, puisque l'air y est toujours à un état de tension notablement supérieur à β; mais cet état diminue, parce qu'il entre sous B des quantités d'air de moins en moins considérables; il sort donc moins d'air à chaque coup; néanmoins, l'air du récipient s'épuise, et on finit par amener la colonne barométrique à ne pas dépasser sensiblement le niveau. Dans cet état de choses, qu'on

pourrait considérer comme un vide véritable, la tension de l'excessivement petite quantité d'air qui reste ne peut plus être appréciée avec le mercure, dont elle ne soutiendrait qu'une petite fraction de millimètre. On y supplée au moyen de l'acide sulfurique concentré, qui remplace le mercure, et qui, pesant sept fois moins, donne une colonne sept fois plus haute, qu'il est possible d'apprécier. On a choisi l'acide sulfurique préférablement à tout autre liquide, parce qu'à ce degré de concentration, il ne donne pas de vapeurs sensibles, et que des vapeurs auraient une tension qui masquerait les résultats qu'on veut reconnaître.

En suivant les coups de piston pour ainsi dire pas à pas, on reconnaît que l'effet de la machine s'arrêtera quand il ne viendra plus sous B que des quantités d'air tellement petites, que la tension sous B ne dépassera presque pas β, ou sera égale à β, plus la résistance de la soupape. Le calcul montre qu'alors, l'air qui reste dans le récipient n'a qu'une tension égale à $\frac{p^2}{P^2}$ β, tandis que sans l'emploi de l'appareil à double épuisement, il serait seulement $\frac{p}{P}$ β. Ainsi, si dans ce dernier cas l'air était raréfié à $\frac{1}{1000}$, il le serait par le double épuisement à $\frac{1}{1000000}$. Ce résultat est un peu différent si l'on tient compte de l'air contenu dans le conduit de communication entre les deux pompes, lequel est d'ailleurs très-fin. Du reste, l'expérience ne confirme pas complétement les résultats de la théorie, ce qu'on attribue surtout à ce que les

petits bouchons ne fermant pas instantanément, il rentre dans le récipient un peu de l'air des corps de pompe.

130. On peut considérer la machine à double épuisement comme donnant un vide parfait; mais il y a un moyen de parvenir à ce but, qui est théoriquement et pratiquement plus complet : tel est le vide produit dans la chambre barométrique; lorsque la colonne de mercure qui remplissait le tube descend d'abord pour se mettre en équilibre à la hauteur convenable, elle laisse au-dessus d'elle un vide parfait, sauf la vapeur mercurielle qui se répand dans ce vide, mais dont la tension est insensible. Or, on peut se procurer un espace vide beaucoup plus considérable en imitant la manœuvre de la construction barométrique. Pour cela, on visse un ballon sur un tube d'un mètre de longueur, et l'on remplit le tout de mercure, puis on renverse l'appareil dans une cuvette pleine de ce liquide, comme pour faire un baromètre. Le mercure descend pour prendre la hauteur convenable; et, comme le tube a une longueur d'un mètre, le liquide descend notablement au-dessous du robinet. On ferme alors celui-ci, et l'on dévisse le ballon, qui se trouve parfaitement vide d'air. Vide absolu.

131. Il faut remarquer que presque toutes les expériences qu'on exécute sous le récipient de la machine pneumatique n'exigent nullement un vide absolu, et que les effets cherchés sont aussi sen- Machine de compression.

sibles que si le récipient ne conservait pas les quelques atomes d'air qu'on y laisse. Mais avant de détailler ces expériences, disons quelques mots de la machine de compression.

Celle-ci est une machine pneumatique à soupapes inverses : celle du piston et celle du bas du corps de pompe s'ouvrent de haut en bas, et sont appuyées tant par des ressorts que par la pression de l'air condensé ; quant au récipient, qui est poussé par l'air qu'y introduit le piston, il est vissé et solidement assujetti sur la platine. Les pistons, en descendant, poussent devant eux l'air qui s'introduit dans les corps de pompe par des soupapes ou des trous latéraux, et le refoulent dans le récipient en abaissant violemment ses soupapes, que repousse l'air comprimé dans le récipient, et qui se ferment quand le piston cesse de fouler. Lorsque celui-ci remonte, il fait le vide au-dessous de lui, jusqu'à ce qu'il ait dépassé la soupape latérale par laquelle l'air rentre, et jusque-là, il a à surmonter la pression atmosphérique supérieure, à raison de 1 kil. par centimètre carré. Cette résistance fort considérable n'est pas élidée par le système du double corps de pompe, comme dans la machine pneumatique ; car la pression collatérale que l'air exerce sur le second piston est plus qu'équilibrée par la tension de l'air que celui-ci foule en descendant. Aussi donne-t-on, en général, un faible diamètre aux corps de pompe.

A chaque coup de piston, on introduit dans le

récipient une quantité d'air constante, égale à la capacité du corps de pompe, à partir de la soupape latérale. Si donc, R étant le volume du récipient p, celui du corps de pompe, on donne n coups de piston, on aura $R + np$ condensés en R; la tension sera donc $\frac{R+np}{R}$ à l'intérieur du récipient. Soit, par exemple, $R=2$ litres $p=\frac{1}{0,3}$, et $n=100$ coups de piston, la tension sera $\frac{2+30}{2}=16$: on dira que l'air est condensé à 16 atmosphères. Lorsqu'on se sert de deux corps de pompe, l'opération marche plus vite; mais, comme nous l'avons dit, les deux pistons ne s'aident pas mutuellement.

Il y a, à la condensation de l'air dans le récipient de la machine de compression, une limite qui dépend aussi de la manière plus ou moins parfaite dont le piston s'applique au fond du corps de pompe. Si, lorsqu'il est au bas de sa course, il laisse au-dessous de lui un espace égal au trentième de la capacité du corps de pompe, on ne pourra pousser la condensation au delà de trente atmosphères; car la tension que le piston donne à l'air au-dessous de lui en le réduisant au trentième de son volume étant précisément de trente atmosphères, les pressions seront les mêmes des deux côtés de la soupape, et on cessera de pouvoir l'ouvrir.

132. La raréfaction de l'air dans la machine pneumatique est mesurée par la descente de la colonne barométrique qui communique avec le récipient. La condensation de l'air dans la machine de compression pourrait être également mesurée par une

colonne de mercure qui irait en croissant; mais un système plus commode consiste dans l'emploi du *manomètre*, qui est l'appareil usité pour la mesure de toutes les tensions d'air ou de vapeur au-dessus de la pression atmosphérique normale.

Manometre. Le *manomètre* est une application remarquable, et de la loi de Mariotte et de l'expérience fondamentale au moyen de laquelle on démontre cette loi. Puisque, en chargeant de colonnes mercurielles l'air contenu dans la petite branche du tube de Mariotte, on réduit cet air à des volumes qui décroissent à mesure que la charge augmente; et qu'à mesure que le volume se réduit, l'élasticité augmente dans le même rapport, la réduction du volume de l'air dans la petite branche d'un tube de Mariotte, par suite d'une force quelconque pressant sur le niveau du mercure, peut servir à mesurer la force quelconque dont il s'agit. Si donc on applique au récipient d'une machine de compression, ou à une chaudière de vapeur, un appareil comme celui que l'on voit ci-contre, on voit qu'on pourra y condenser de l'air en *ds* par l'effet de la pression qui sera exercée en *m*. à travers l'ouverture *o*, et que l'appareil (s'il est suffisamment résistant) pourra servir à la mesure de pressions indéfinies.

Au moment où le manomètre commence à fonctionner, le mercure est de niveau dans les

deux branches en *a*, *b*, et la tension de l'air intérieur *bs* est égale à celle qui agit en *o*, et que nous supposerons une pression atmosphérique normale. A mesure que celle-ci augmente, elle repousse le mercure, condense l'air en *bs*, et établit par suite une différence de niveau entre les deux colonnes mercurielles. Dans le cas représenté par la figure, la tension de l'air en *ds* est égale à la pression qui s'exerce en *o*, *moins* la colonne *dn*, qui fait la différence des niveaux. Or, par la graduation du tube, on connaît le volume primitif de l'air et son volume réduit; par celui-ci, augmenté de la colonne *dn*, on connaîtra la pression qu'il s'agira de mesurer. Soit, par exemple, le volume primitif de l'air $=12$ divisions, et le volume actuel réduit de 3,4 divisions; qu'il y ait de plus 11 centimètres de différence de niveau, la pression atmosphérique actuelle étant 75 centimètres, la tension en *o* sera $(\frac{12}{3,4})75+11=276$ centimètres. Or, $\frac{276}{75}=3,676$, ou 3 atmosphères et deux tiers.

133. Nous allons exposer maintenant les diverses expériences qu'on exécute avec la machine pneumatique et la machine de compression, et nous commencerons par la première.

1° On constate, par expérience, la pression que l'air exerce sur tous les corps, et l'on reconnaît qu'elle est égale à celle d'une colonne d'eau qui aurait pour base la surface pressée, et pour hauteur 10^{m},3 environ. Outre le baromètre qui communique avec le récipient, et dont l'abaissement progressif, lorsqu'on fait agir la machine, met **Hémisphères de Magdebourg.**

cette vérité en évidence, on la rend, pour ainsi dire, plus manifeste, au moyen des *hémisphères de Magdebourg*. Une sphère composée de deux calottes creuses à rebord, qui s'appliquent exactement l'une contre l'autre, est portée sur un pied à travers lequel s'étend un conduit qui en fait communiquer l'intérieur avec l'atmosphère. En plaçant sur la platine de la machine pneumatique le pied de cet instrument, on y fait le vide, et on maintient ce vide en fermant immédiatement le robinet que le conduit traverse. Alors on éprouve une résistance considérable à la séparation des deux calottes. Si l'on saisit l'appareil par le pied et qu'on suspende des poids à l'anneau, ces poids ne pourront séparer les hémisphères que lorsqu'ils équivaudront à une colonne d'eau ayant pour base le cercle *bd*, et une hauteur de $10^{m},3$. Nous supposons, bien entendu, que le vide est fait exactement dans l'intérieur de la sphère; comme il s'en faut toujours d'une certaine fraction, représentée par un certain nombre de millimètres de mercure, il s'en faut d'une quantité proportionnelle que les poids qui séparent les hémisphères ne pèsent autant que cette colonne. En principe, il faut compter la pression atmosphérique exercée à la surface des corps, à raison de $1^{kil.},04$ par centimètre carré.

Une expérience analogue à celle des hémisphères de Magdebourg peut être faite sans machine pneumatique et sans vide, bien qu'on se serve de

ces moyens pour en compléter la démonstration. Si les hémisphères, au lieu d'être creux, étaient pleins, ou seulement fermés par une base parfaitement plane et parfaitement polie, en les appliquant avec soin l'un à l'autre, on formerait un système qui se soutiendrait comme dans le cas précédent : non-seulement l'hémisphère supérieur supporterait le poids de l'inférieur, mais encore on pourrait charger celui-ci de poids assez considérables, avant de détruire l'adhésion des deux hémisphères. La théorie est la même que dans le cas précédent : l'hémisphère inférieur reste suspendu avec les poids qui le chargent, par l'effet de la pression d'une colonne d'air d'une base égale à la sienne. Quand on fait le vide à l'intérieur, c'est pour supprimer la réaction de l'air interne qui détruirait l'effet de la pression atmosphérique ; or, quand des hémisphères pleins sont appliqués par leurs bases, il n'y a pas non plus de réaction interne, et la pression extérieure produit son effet. Cette expérience est frappante quand elle réussit bien ; il n'y a pas moyen d'invoquer l'horreur de la nature pour le vide. Mais elle est difficile à bien faire ; car la condition de deux surfaces parfaitement planes et polies est au moins fort difficile à réaliser ; et l'on ne peut guère mettre obstacle à l'introduction de l'air entre les plaques, au moment où on les applique l'une à l'autre. Lorsque l'appareil est bien conditionné et fonctionne d'une manière satisfaisante, si on le place sous le récipient de la machine et qu'on fasse le

vide, l'hémisphère, ou la plaque inférieure, ne tarde pas à tomber : ce qui est la conséquence évidente de la suppression de l'air dont l'élasticité diminue avec la raréfaction. Or, l'élasticité est l'équivalent d'un poids, comme elle en est le produit. Du reste, on remarque, dans chaque cas, que la puissance d'adhésion est proportionnelle à l'étendue des surfaces adhérentes, comme il est manifeste, *à priori*, que cela doit être.

Jet d'eau dans le vide.

2° La moindre quantité d'air, à l'intérieur d'une cavité, peut équilibrer la pression atmosphérique, non par son poids, il est vrai, mais par l'élasticité qu'elle possède, comme on le voit dans une foule de cas, ou plutôt comme tout en est exemple dans la nature. C'est ce que montre encore bien l'expérience du jet d'eau dans le vide. L'appareil ci-contre est fermé de toutes parts, si ce n'est qu'un conduit traverse son pied ; au moyen de ce conduit on peut faire le vide à l'intérieur, comme dans le cas précédent. Quand le vide est produit et maintenu d'abord par la fermeture du robinet, on place le pied de l'appareil dans l'eau, et l'on ouvre, avec le robinet, le conduit qui se termine en ajutage. Aussitôt le liquide s'élance en jet rapide qui va frapper le plafond du vase de cristal. La pression atmosphérique extérieure pourrait ainsi élever l'eau à 10 mètres, ce qu'on ne peut vérifier il est vrai, vu l'impossibilité de construire un appareil de cristal d'une taille convenable. Mais en ne raréfiant l'air que médiocre-

ment, on doit avoir un jet de la hauteur de l'appareil, et la vérification du principe est facile à faire. Du reste, dans cette expérience, le jet diminue rapidement de hauteur, parce que le liquide entraîne de l'air avec lui en entrant dans l'appareil, et que cet air, même en très-petite quantité, exerce immédiatement une réaction contre l'atmosphère.

Chute de tous les corps avec égale vitesse.

3° On reconnaît, en faisant le vide, que tous les corps doivent tomber également vite, quelque différents qu'ils soient par leur nature, leur poids et leur volume, lorsqu'on peut supprimer l'air, dont l'action seule produit les différences qu'on observe communément, et dont la résistance est proportionnelle aux surfaces qui le traversent. Un tube de cristal de 2 mètres de long, sur quelques centimètres de diamètre, reçoit des fragments de différents corps très-inégaux en densité : une petite lame de platine, un grain de plomb, un petit morceau de pierre, un autre de bois, un autre de liége, puis de petits brins de laine et de papier. Lorsque, dans les circonstances ordinaires, on retourne le tube, ces petits objets tombent d'un bout à l'autre avec des vitesses très-diverses; les plus lourds et les plus ramassés prennent les devants; le liége et surtout la laine et le papier restent en arrière. Or, si l'on fait le vide dans ce tube avec un certain degré de perfection, on voit, toutes les fois qu'on le retourne, tous les corps qu'il renferme tomber côte à côte et arriver simultanément au bas. C'est

donc la résistance de l'air qui, s'exerçant inégalement sur les corps en raison de leur poids et de leur surface, introduit dans leurs vitesses de chute les différences qu'on y observe.

Au reste, on prouve ce fait par une autre expérience très-simple. Si on laisse tomber d'une même hauteur une pièce de 5 francs et une rondelle de papier d'un même diamètre, la pièce de monnaie rencontrera la terre avant celle de papier; celle-ci même, au lieu de tomber d'abord, voltigera quelquefois et remontera même : il suffit d'un peu d'agitation dans l'air pour produire cet effet. Or, si on applique le cercle de papier sur la pièce de 5 francs, sans établir d'ailleurs aucune adhésion, et qu'on laisse tomber leur ensemble, la pièce métallique en dessous, la pièce et le papier arriveront simultanément à terre. Cela vient de ce que le morceau de métal pousse l'air devant lui, et ouvre la voie au papier qui ne rencontre plus de résistance.

Chute de la fumée.

4° On sait que la flamme et la fumée même s'élèvent dans l'air, et l'on explique ce fait, contraire en apparence à la pesanteur universelle, en disant que ces corps ne montent que parce qu'ils sont moins pesants que l'air lui-même, comme la plupart des bois montent à la surface de l'eau, et le plomb lui-même à la surface du mercure. Or, on vérifie cette explication en plaçant sous le récipient de la machine une bougie allumée. A mesure qu'on fait le vide, la flamme s'écrase; toutefois, cet effet n'est pas très-sensible, parce que

le corps gazeux très-chaud est aussi peu dense que l'air très-raréfié; d'ailleurs la bougie, dans un air pareil, ne tarde pas à s'éteindre. Mais la fumée qui suit cette extinction tombe manifestement dans le bas du récipient, au lieu de s'élever comme elle le fait toujours lorsqu'on souffle une bougie et qu'on l'éteint.

Pluie de mercure.

5° Si l'on visse, au sommet d'un large tube de cristal fermé par une peau de chamois *p*, une coupe métallique sans fond, à qui la peau de chamois en servira, et qu'on remplit de mercure, qu'ensuite vissant la garniture inférieure de ce cylindre sur la machine, on fasse le vide à l'intérieur, on verra, après quelques coups de piston, le mercure se tamiser à travers la peau de chamois et tomber en pluie d'argent dans le fond du tube. Il est aisé de reconnaître, dans cette très-jolie expérience, l'effet de la pression atmosphérique sur le liquide de la coupe, pression que ne neutralise plus suffisamment la réaction de l'air intérieur, dès que cette réaction est diminuée par l'effet de la dilatation. Une planche de bois très-mince pourrait remplacer la peau de chamois. Le tube *ts* sert de conduit pour aspirer l'air à l'intérieur; il est recourbé pour que le mercure, en tombant, ne pénètre pas dans les conduits métalliques.

Explosion des membranes.

6° Si l'on ferme le tube de cristal, non par une peau de chamois, mais au moyen d'un parchemin mouillé, on remarque, à mesure qu'on fait le vide, que ce parchemin se courbe et s'enfonce

en dedans, comme s'il était poussé par un piston à base sphérique. Il est aisé de reconnaître ici l'effet de la pression supérieure. Si, quand le parchemin est dans son plus grand état de tension, on le crève d'un coup de canif, il se fait une explosion violente, comparable à un coup de pistolet; cela vient de la rapide entrée de l'air dans le vide, et de l'ébranlement que ce choc communique et aux diverses parties de l'appareil et à l'air ambiant. Nous dirons plus loin avec quelle vitesse l'air rentre dans le vide, ou dans l'air lui-même, à un degré donné de raréfaction; et l'on verra que, dans le cas actuel, le choc dû à cette vitesse peut être comparé à la réaction des gaz que développe l'inflammation de la poudre.

Gonflement par dilatation sous le vide.

7° Une expérience qui rentre dans celle-là, quoique sous une forme inverse, consiste à placer, sous le récipient, une vessie fermée, mais dégonflée et chiffonnée. A mesure qu'on fait le vide, la vessie s'enfle progressivement, et en poussant l'opération assez loin, on la tendra au point de la faire crever. On comprend aisément que l'air intérieur de la vessie, d'abord en équilibre avec celui qui l'entoure dans le récipient, prend le dessus à mesure que celui qui la presse s'affaiblit par la raréfaction, et que son élasticité, quand la vessie est entièrement tendue, peut croître encore par la diminution de la résistance extérieure, de telle sorte qu'il tende à occuper un espace plus considérable. Or, les parois de la vessie ne cédant plus, c'est comme si cet air se trouvait comprimé.

S'il tendait à occuper un espace double, l'effet serait le même que si cet air, qui ne peut s'épandre, était réduit à la moitié de son volume; or, alors, d'après la loi de Mariotte, sa tension serait double, et l'on conçoit qu'elle puisse augmenter en telle mesure, qu'elle triomphe de la résistance des parois de la vessie.

Au lieu d'une vessie, on peut mettre sous le récipient des fruits fanés, de vieilles pommes, par exemple. A mesure qu'on fait le vide, la peau se gonfle, les rides s'effacent, la surface du fruit devient unie et brillante; c'est un complet rajeunissement: on dirait le vieil Éson reprenant la fraîcheur de l'adolescence sous l'influence magique des opérations de Médée.

8° On démontre, par une expérience fort simple et fort curieuse, que l'air est le véhicule et l'instrument ordinaire du son, et que si, au lieu de l'enveloppe gazeuse dans laquelle plonge l'oreille, cet organe ne trouvait autour de lui que le vide, il n'y aurait pas d'audition. Pour le prouver, on place sous le récipient un petit mécanisme d'horlogerie, qui, lorsqu'on donne la liberté au ressort moteur, peut sonner pendant une minute au moins. L'appareil est d'ailleurs placé sur un coussin qui étouffe l'ébranlement que les coups de marteau pourraient imprimer au récipient et à la table. Or, à mesure que l'on fait le vide, on remarque que le son, qui s'entendait parfaitement d'abord, s'affaiblit d'une manière progressive; quand la raréfaction est très-grande, le bruit est

Extinction du son dans le vide.

très-faible; sous une machine parfaite, il devient sensiblement nul : on voit le martelet frapper sur le timbre, et aucun retentissement n'accompagne ses coups. Laisse-t-on rentrer l'air, le son renaît avec lui : faible d'abord, il se renforce à mesure que l'air se condense à l'intérieur; et quand l'équilibre est rétabli entre les deux faces du récipient, le son a repris son intensité primitive.

Au lieu d'une atmosphère d'air à l'intérieur, on peut introduire dans le récipient tout autre gaz, de l'hydrogène, par exemple, et de l'acide carbonique. Les conclusions sont les mêmes, si ce n'est que l'intensité du son varie, toutes choses égales d'ailleurs, avec la densité du gaz.

Ébullition à basse température.

9° On fait bouillir de l'eau dans un air très-raréfié à une température assez basse. Une cornue contenant de l'eau est placée sur le feu, et son col, au moyen d'un tube convenable, s'applique au récipient de la machine, à l'intérieur duquel il communique. Or, à 35°, par exemple, on verra l'eau bouillir dans la cornue, en offrant d'ailleurs les phénomènes communs de l'ébullition dans l'air. Cela vient de ce qu'à cette température la force élastique de la vapeur qui tend à se former au fond du vase, où l'eau est la plus chaude, force qui est très-inférieure à la pression atmosphérique normale, est capable de vaincre la faible tension de l'air raréfié, et d'en soulever les colonnes avec la petite colonne d'eau qui pèse encore sur elle. On trouve dans les tables qu'à 35° la force élastique de la vapeur d'eau est égale à 40 milli-

mètres, ou à la 19ᵉ partie de 760 m., pression atmosphérique normale. Quand donc l'air du récipient sera réduit à $\frac{1}{19}$ ou $\frac{1}{20}$, la tension de sa vapeur à 35° sera capable de le soulever, et il y aura ébullition.

10° Il ne faut pas confondre ce phénomène avec celui qui se produit dans toute masse d'eau sous le récipient de la machine. Dès qu'on raréfie l'air, on voit une foule de petites bulles partir de tous les points de la paroi interne du vase et se répandre à la surface: c'est l'air en dissolution dans l'eau qui, déchargé d'une partie de la pression extérieure, reprend son état gazeux. Si l'on place sous l'eau un morceau de sucre, on en voit sortir une énorme quantité de ces bulles d'air, dont la réunion forme un volume plusieurs fois égal à celui du sucre. Des morceaux de différents bois offrent des résultats analogues.

Air condensé dans les pores.

Cette dernière expérience donne lieu à une remarque importante. Beaucoup de substances organiques sont considérées comme moins denses que l'eau, parce qu'elles surnagent à ce liquide, et elles le sont en réalité en prenant leur volume extérieur pour leur volume réel. Tels sont les bois, le charbon, les tissus, les cordes. Or, si on place sous le récipient un vase d'eau dans laquelle nagent ces diverses substances, on les voit aller à fond dès que l'air est suffisamment raréfié. C'est qu'alors l'air engagé dans leurs pores les abandonne et cède sa place à l'eau : ce n'est donc plus un centimètre cube, par exemple, qui déplace un

pareil volume de liquide, mais un centimètre moins les vides plus ou moins considérables où l'air était primitivement logé; et le volume devenant moindre sous le même poids, on conçoit que la densité soit plus grande et puisse dépasser celle de l'eau.

Extinction de la flamme et de la vie dans le vide.

11° Tout le monde sait que l'air est l'instrument et la matière de la respiration: il est donc le principal et indispensable agent de la vie. La machine pneumatique permet d'étudier les phénomènes qui résultent de sa privation partielle ou totale. On met sous le récipient un oiseau, un lapin, un chat, et l'on fait agir les pistons. A mesure que l'air se raréfie, on voit l'animal s'étonner d'abord, puis s'agiter, puis tomber sur le flanc et se débattre contre une douleur évidemment très-vive. Si le supplice du vide se prolonge, il entre en agonie, et finit par expirer. Si, au contraire, avant que le terme fatal soit atteint, on lui rend l'air progressivement, il respire, se relève, et reprend ses forces; sorti de sa prison, il conserve quelque temps des traces du trouble jeté passagèrement dans les fonctions de son organisme. Il faut observer, toutefois, que les oiseaux qu'on soumet à cette opération subissent, en général, des lésions considérables, lorsque le jeu du piston est rapidement mené; il y a déjections, vomissements, enflure, et après même qu'on a rendu l'air, le petit animal ne tarde pas à périr. Ceci est un effet de la suspension brusque de la pression extérieure et de la réaction des fluides intérieurs,

un véritable effet de ventouses; effet mécanique qui se combine toujours plus ou moins avec l'asphyxie due à la privation de l'élément respirable.

Vivre et brûler sont une même chose; car le corps qui brûle et l'animal qui respire absorbent dans l'air une certaine quantité d'oxygène, qu'ils convertissent en acide carbonique. Là où la vie est impossible, la combustion l'est aussi, et réciproquement. Aussi, une bougie allumée présente-t-elle sous le récipient de la machine des phénomènes analogues à ceux qu'offre l'animal privé d'air : elle souffre, elle s'affaiblit, passe à la période agonisante, et expire, ou, comme on dit vulgairement, s'éteint, si l'on tarde à lui restituer l'élément de la combustion, c'est-à-dire à faire rentrer l'air.

Cette sympathie entre la flamme et l'animal qui respire offre un caractère important pour reconnaître la qualité des milieux que l'animal doit fuir ou qu'il peut impunément occuper. En plaçant, au moyen d'une corde ou d'une baguette, une bougie allumée dans le milieu problématique, on reconnaît, à l'état de la flamme, ce qu'il en faut penser. Si elle pâlit ou paraît souffrir, le milieu est de mauvaise nature; et si elle ne tarde pas à s'éteindre, il doit être réputé inabordable. C'est ainsi qu'on éprouve les égouts, les fosses d'aisance, les cavités souterraines depuis longtemps fermées. Nous ajouterons, au sujet des égouts et des fosses, qu'on se sert de mèches soufrées pour en faire l'exploration, attendu que l'acide sulfureux qui en résulte a la propriété de décomposer,

par l'intermédiaire de l'eau, l'acide hydrosulfurique, qui est un des produits ordinaires des décompositions putrides; ce qui offre un procédé d'exploration et d'assainissement tout à la fois.

Congélation de l'eau dans le vide. 12° On exécute sous le récipient de la machine pneumatique une jolie expérience dont la théorie appartient à un ordre de faits dont nous aurons à nous occuper plus loin. On met sous le récipient un bassin large et peu profond, qu'on remplit d'acide sulfurique concentré; et, au-dessus de ce bassin, on dispose une capsule contenant une mince couche d'eau. Lorsque l'air est très-raréfié, et si l'on maintient le vide quelque temps, la surface de l'eau ne tarde pas à se couvrir d'une légère couche de glace. C'est que l'évaporation, comme on sait, produit le refroidissement; que l'eau se vaporise dans le vide avec beaucoup de rapidité, et que le vide qui serait détruit par la formation d'abondantes vapeurs est maintenu par l'acide sulfurique, qui absorbe les vapeurs aqueuses à mesure qu'elles se forment. Il en résulte donc une évaporation et un refroidissement continus : de là, formation d'une légère couche de glace. Nous donnerons, dans un des chapitres suivants, des moyens plus commodes, plus simples et plus productifs pour former de la glace en tout temps.

Au reste, toute production de vide, toute raréfaction ou dilatation d'air, tout coup de piston produit du froid dans le récipient. Donc, aussi, comme l'expérience le prouve, toute condensation d'air élève la température; c'est ce qu'on recon-

naît au moyen d'un thermomètre placé sous la cloche. Ceci explique, du moins en partie, pourquoi la température des couches atmosphériques supérieures est si basse, en comparaison des couches voisines de la terre; car celles-ci, pressées par le poids des couches qui les surmontent, sont d'une densité supérieure à celle de ces hautes couches. Ainsi, toutes choses égales d'ailleurs, on devra rencontrer un milieu plus chaud en approchant de la terre.

134. Dans les expériences qui précèdent, et généralement dans toutes celles qui se font sous la machine pneumatique, il est important de se servir de fermetures parfaites et qui gardent bien le vide. Dans les machines qui ne sont pas d'une grande perfection, on voit le baromètre remonter lentement dès que le jeu des pompes a cessé. C'est que l'air s'insinue difficilement, mais avec beaucoup d'énergie, par des conduits imparfaitement fermés; c'est qu'il pénètre entre la platine et la base du récipient, qui sont unis par une simple couche de suif que la pression extérieure écrase et gerce, quand elle y trouve le moindre défaut. On concevra cette invasion subtile et énergique de l'air à travers ces clôtures imparfaites, en calculant sa pression extérieure, ou, ce qui est la même chose, la vitesse avec laquelle l'air tend à rentrer dans le vide.

Vitesse de l'air rentrant dans le vide.

Considérons une colonne atmosphérique d'un centimètre carré de base, et pressant sur une égale portion de la paroi du récipient. Cette co-

lonne, qui a toute la hauteur de l'atmosphère, n'est pas également dense dans tous les points de sa longueur; la densité vers sa base est $\frac{1}{770}$ de celle de l'eau, et 10,468 fois moindre que celle du mercure. La pression que les diverses couches exercent sur sa base met donc celle-ci dans le même état de tension que si, ayant partout la même densité, elle avait 10,468 fois la hauteur d'une colonne de mercure également pesante; ce qui donne $10{,}468 \times 0^{m},76 = 7{,}956$ mètres. Or, appliquant à cette base le principe de Torricelli, on a $V = \sqrt{2gh} = \sqrt{19{,}62.7956} = 395$ mètres; ce qui est, à très-peu de chose près, la vitesse d'un boulet de 24 sortant de sa pièce. Telle est la puissance avec laquelle l'air tend à rentrer dans le vide, et à s'y insinuer par les plus imperceptibles fissures.

Si le vide n'est pas fait complétement, il y a une réduction à faire sur cette vitesse : d'un 20e, par exemple, si le baromètre conserve un 20e de la hauteur normale. On conçoit donc pourquoi nous avons comparé le choc produit par l'air rentrant dans l'expérience 6°, à l'ébranlement qu'occasionne un coup de pistolet. On démontre, d'ailleurs, que la vitesse d'écoulement ou de pression est indépendante de la variation barométrique, et qu'elle est réciproque à la racine carrée de la densité du gaz que l'on considère (1). On trouve ainsi que le

(1) En effet, la formule est $v = \sqrt{2g.10468.0{,}76}$. Or, si le dernier facteur 0,76 devient n fois plus grand, l'air com-

gaz hydrogène rentre dans le vide avec une vitesse de 15 à 16 cents mètres.

135. Voici maintenant quelques expériences et appareils qui se rattachent au jeu de la machine de compression. **Fontaine de compression.**

La *fontaine de compression* est une bouteille ou un flacon de l'ordre le plus simple, dont le goulot est fermé par un obturateur quelconque que traverse un tube; ce tube plonge jusqu'au fond du flacon au-dessous d'une couche d'eau. Au moyen d'une pompe foulante à air, on y introduit de l'air qui se comprime entre l'eau et le bouchon; l'introduction se fait ordinairement par le tube sur lequel on visse la pompe, et l'air foulé traverse le liquide et s'élève dans la partie A. Quand le jeu de la pompe éprouve trop de résistance, ce qui indique un air intérieur comprimé à plusieurs volumes, on ferme le robinet t, et l'on substitue à la pompe un ajutage convenable. Le robinet étant alors ouvert, on a un jet d'eau qui s'élance à une grande hauteur.

L'air condensé en A presse sur l'eau du flacon

primé devient n fois plus dense, et le multiplicateur 10468, qui exprime la densité du mercure par rapport à l'air, devient n fois moindre. On a donc $v=\sqrt{2g.n.0{,}76.\frac{10468}{n}}$ $=\sqrt{2g.0{,}76.10468}$, comme auparavant.

En second lieu, si on substitue à l'air un gaz de densité δ, il est clair que la densité du mercure, par rapport à ce nouveau gaz, sera δ fois plus petite $=\frac{10468}{\delta}$. D'où $v=\sqrt{2g.0{,}76.\frac{10468}{\delta}}$ $=\frac{1}{\sqrt{\delta}}\sqrt{2g.0{,}76.10468}$. Ce qui démontre le principe énoncé.

et la fait monter dans le tube, ce qui diminue le volume de l'eau et augmente celui de l'air; à mesure que l'eau sort en jet, l'air se dilate en perdant de sa force élastique; la hauteur du jet ira donc en diminuant. Mais à l'ouverture du robinet, le jet peut s'élancer très-haut; par exemple, si l'on a introduit en A un peu plus d'air que celui qui remplissait primitivement cette capacité, ce qui lui donne une tension d'un peu plus de deux atmosphères, le jet devra s'élancer d'abord à $10^{m},3$, puisque l'air en A peut soutenir deux atmosphères, ou, ce qui revient au même, une atmosphère normale en *t*, et une colonne d'eau équivalente. D'ailleurs, la durée du jet dépendra de la quantité d'eau qui garnit le vase, de la finesse de l'ajutage et du degré de condensation qu'on aura donné à l'air en A.

Les écoliers exécutent sans pompe foulante, et d'une manière très-simple, la fontaine de compression. Une bouteille avec un bouchon ordinaire, que traverse un chalumeau de verre ou de paille, suffit pour cela. On insuffle vivement avec la bouche à travers le tube, et l'on introduit ainsi, dans la bouteille, de l'air qui, lorsqu'on cessera de souffler, produira un jet comme dans le cas précédent. Il est inutile de dire que la durée du jet ne dépasse pas quelques secondes.

Fusil à vent. 136. Le *fusil à vent* est une forme particulière de la machine de compression.

Il se compose d'une crosse métallique, creuse, très-solide, fermée à son orifice par une soupape

qui s'ouvre de dehors en dedans. Sur la crosse, et au-dessus même de la soupape, on visse une pompe foulante à air, au moyen de laquelle on introduit, dans ce récipient, autant d'air que l'on veut. Puis on substitue à la pompe un canon de fusil, qui se visse hermétiquement sur la crosse, et qui est chargé et bourré à la façon des fusils ordinaires.

La soupape est solidement fermée par l'extrême tension de l'air comprimé dans la crosse. La détente de l'arme porte un mécanisme propre à ouvrir la soupape; quand on la fait agir par l'action du doigt pendant un seul instant, l'air s'échappe avec force et pousse la balle que le canon renferme. La soupape, en se refermant, tient encore emprisonné l'air de la crosse, sauf la petite quantité qui vient d'en sortir et de chasser la première balle. Une seconde balle pourra donc être chassée par le même mécanisme; puis une troisième et plusieurs autres après celle-là. Il est clair qu'à mesure qu'un nouveau coup est tiré, l'air de la crosse perd une partie de sa tension, et que la balle suivante est poussée avec moins de force. Enfin, il arrive un moment où l'élasticité de cet air est trop faible pour vaincre la résistance de la bourre.

On charge la crosse en la tenant entre les pieds serrés, et foulant à deux bras le piston de la pompe. L'air qui s'échappe à chaque coup de fusil étant, du moins aux premiers coups, animé d'une très-grande vitesse, il en résulte d'abord un sifflement

rapide qui ne se fait entendre, il est vrai, qu'à très-petite distance. On dit même que quelquefois un peu de lumière accompagne le choc de l'air contre la balle. Cela peut s'expliquer par la compression rapide de l'air, comme dans le briquet pneumatique.

La puissance d'un fusil à vent dépend du degré de condensation de l'air à l'intérieur de la crosse. Si celle-ci est petite, on la charge en peu de temps; mais on ne peut tirer qu'un petit nombre de coups: les premières balles sont poussées avec autant de force que par l'air d'un grand réservoir; mais le petit réservoir est bientôt épuisé. Une crosse d'une capacité plus grande fournit à plus de coups, et comme ce que chaque coup emporte d'air condensé est peu de chose, par rapport au volume total, l'élasticité diminue lentement; mais ce système a l'inconvénient d'exiger une longue manœuvre de la pompe. On peut, avec un fusil ordinaire et une balle de calibre, percer, à vingt pas, une planche de chêne de 15 millimètres d'épaisseur; et les six premières balles sont capables de produire cet effet. On a construit des fusils à vent qui pouvaient lancer jusqu'à cent balles de suite, avec un litre d'air condensé.

Armes à feu. Les armes à feu ordinaires lancent leurs projectiles précisément en vertu du même principe. L'inflammation de la poudre développe un certain nombre de gaz, tels que l'oxygène, le gaz sulfureux, l'acide carbonique, l'azote, la vapeur d'eau, qui, en vertu de leur expansion naturelle

favorisée par la très-haute température, tendent à occuper un espace plusieurs centaines ou même plusieurs milliers de fois plus considérable que celui occupé par la poudre. Ils sont donc dans le même cas que si, pris dans leur état naturel, on les réduisait par la pression à un volume plusieurs milliers de fois plus petit. Ils se débanderont donc avec violence et tous à la fois, n'étant pas emprisonnés par la soupape du fusil à vent.

137. C'est une petite machine de compression, ou une sorte de fusil à vent, que l'appareil connu sous le nom de *bucquois* ou de *canonnière*. Ce jouet d'écolier se compose d'un bâton de sureau dégarni de sa moelle, et long de 2 à 3 décimètres. Dans ce tube, on fait entrer, à frottement, un tampon d'étoupe ou de papier mouillé qui se serre fortement contre les parois, et cette bourre est amenée au moyen d'une baguette en *md* à l'une des extrémités du tube. Cela fait, on introduit, par l'autre extrémité, un tampon pareil qu'on pousse au moyen de l'écouvillon *nbk*, comme pour lui faire rejoindre le premier tampon. Mais comme il résulte de ce mouvement que l'air compris dans le tube entre les deux tampons est condensé de plus en plus, il vient un moment où sa tension chasse avec violence le tampon *md*, auquel le tampon suivant vient se substituer, par l'impulsion de la baguette qui le pousse, baguette dont la longueur est calculée de telle sorte, que

Canonnière.

le bourrelet *bk* vienne frapper en *h*, quand le tampon qu'il chasse est arrivé en *m*.

C'est le frottement des tampons contre les parois internes du tube qui équilibre pendant quelque temps l'élasticité croissante de l'air emprisonné; il faut donc que cet air ne puisse s'échapper entre les parois et les tampons, ce qui suppose ceux-ci susceptibles d'une compression et d'un tassement considérables; aussi l'effet produit est-il faible avec les petites canonnières formées d'un tuyau de plume, et tamponnées avec de petits cylindres enlevés par le tuyau lui-même dans des tranches de pommes de terre crues : l'air glisse aisément entre ces petits cylindres et le tuyau, et c'est pour cela seulement, et non à cause de la petitesse des appareils, que l'effet en est faible. Un petit appareil, dans de bonnes conditions, donne autant de vitesse aux bouchons chassés que peut le faire un grand; car cette vitesse dépend de la tension de l'air comprimé, et non de la quantité absolue, et l'on peut comprimer l'air à deux, trois, dix atmosphères, dans une petite capacité aussi bien que dans une grande. Mais la quantité de mouvement ou l'effet du choc est proportionnel à la masse de tampon, et c'est par là que l'effet des grands appareils l'emporte sur celui des petits. Avec une bonne canonnière, on pourrait chasser une balle de manière à briser des planches.

CHAPITRE XII.

DU SIPHON, ET DE BEAUCOUP D'AUTRES APPAREILS DONT LE JEU EST FONDÉ SUR LE POIDS OU SUR L'ÉLASTICITÉ DE L'AIR.

138. Le siphon est un instrument très-connu, dont le jeu repose entièrement sur l'inégalité des pressions qui s'exercent à ses deux extrémités en *n* et en *p*. En ces deux points agissent deux pressions atmosphériques égales, mais partiellement élidées par le contre-poids de deux colonnes d'eau inégales *sn*, *sp*; celle-ci, ou l'extérieure, étant la plus longue, la pression atmosphérique perd plus en *p* qu'en *n*; l'équilibre est détruit, et la plus faible qui agit en *p*, cédant à l'autre, il y a écoulement. Siphon.

On sait qu'il faut considérer comme branche du siphon non la branche *as* tout entière, mais seulement la partie *sn* qui s'élève au-dessus de l'eau; car, dans la partie *an*, le liquide se tient, par la loi de niveau, à la hauteur de tout le reste; ce n'est que la colonne *ns* qui réagit contre l'atmosphère. Donc, tant que la partie *sn*, malgré l'abaissement de l'eau dans le vase, restera plus courte que la branche extérieure *sp*, il y aura écoulement.

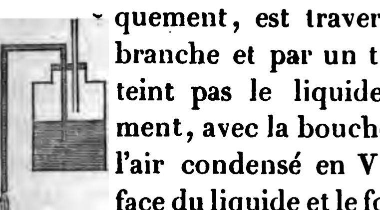
On *amorce* ce siphon par aspiration en *p*; ou, si le liquide est de nature à ne pas pouvoir être

mis en contact avec la bouche, on emplit d'abord le siphon en le renversant dans la position d'un U, versant du liquide jusqu'à ce que la petite branche soit pleine; puis, bouchant celle-ci avec le doigt, on achève de remplir la longue branche. Alors, on passe le doigt à l'extrémité de celle-ci, et on place la petite dans le vase qu'il s'agit de vider.

Comment on l'amorce.

Pour éviter le contact des liquides avec la bouche, on se sert aussi de siphons à boule. Bouchant l'extrémité *p*, on aspire par le tube latéral *obg*. Le liquide remplit immédiatement le siphon et s'élève aussi dans le tube latéral; mais comme il lui faut un certain temps pour remplir la boule, on retire le doigt de l'extrémité *p*, avant que le liquide soit parvenu à la bouche, et dès lors l'écoulement se fait comme à l'ordinaire. Mais il est important de remarquer que la vraie longueur de la branche du dehors n'est pas *sp*, mais *so*; car la pression atmosphérique s'exerce en *o* contre le liquide qui tombe : il ne faut donc pas tenir compte de la partie *op*, et on doit faire en sorte que le point *o* se trouve au-dessous de celui jusqu'auquel on veut faire descendre le niveau du liquide. Si l'on veut éviter le contact de celui-ci même avec le doigt qui bouche l'extrémité *p*, on interpose entre eux un petit morceau de peau ou de papier plié en double.

On peut encore amorcer un siphon sans aucun contact avec le liquide, en mettant celui-ci dans un flacon dont le bouchon, qui ferme hermétiquement



quement, est traversé et par la courte branche et par un tube droit, qui n'atteint pas le liquide. On insuffle fortement, avec la bouche, par le tube droit; l'air condensé en V pressera sur la surface du liquide et le forcera à monter dans la courte branche du siphon, d'où il passera dans la plus grande et s'écoulera en *g*; le tube droit donnera ensuite à l'intérieur du flacon la pression atmosphérique nécessaire à la production du phénomène. Cet appareil de décantation est employé dans plusieurs expériences chimiques.

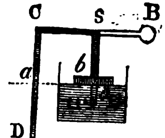
Dans les grands siphons qui servent à transvaser les vins, et où, vu leur capacité, l'aspiration ne pourrait faire un vide suffisant, on amorce au moyen d'une petite pompe. Dans les fabriques d'acide sulfurique, on transvase le liquide bouillant, en versant, par une ouverture pratiquée au sommet, une certaine quantité d'acide dans la longue branche préalablement bouchée à sa partie inférieure. Lorsqu'on a fermé l'ouverture d'en haut, on débouche celle d'en bas, et le liquide s'écoule; or, comme l'orifice est assez étroit pour que l'air ne rentre pas, l'écoulement de la grande branche produit, à sa partie supérieure, un vide qui équivaut à une aspiration; le liquide monte donc dans la petite branche, et le siphon se trouve amorcé.

On peut construire des siphons de toutes matières, même en gros tuyaux de fonte ou en maçonnerie, comme on construit des tuyaux de

cheminées qui prennent toutes sortes de courbures. Pour les amorcer et les faire fonctionner convenablement, on en bouche d'abord les deux extrémités, et on les remplit d'eau par une ouverture faite à la partie supérieure; puis on ferme cette ouverture, et l'on débouche les deux extrémités. On fait des siphons de ce genre pour produire le déversement d'une rivière dans un canal, passer par-dessus une digue..., etc. Il faut évidemment que la hauteur de la plus courte branche soit inférieure à 10 mètres.

139. La vitesse d'écoulement, par un siphon, varie essentiellement d'un instant à l'autre; car, à mesure que le niveau s'abaisse, la différence des deux branches, ou plutôt des deux colonnes liquides qu'elles contiennent, devient moins considérable; or, la vitesse d'écoulement dépend de cette différence. Soit celle-ci représentée par δ, le principe de Torricelli donne $V = \sqrt{2g\delta}$; la vitesse est donc proportionnelle à la racine carrée de cette différence. Quand δ est très-petit, V est également très-petit; et quand δ devient zéro, c'est-à-dire, quand le niveau s'abaisse jusqu'au bas de la branche extérieure, il vient $V = 0$, c'est-à-dire, que l'écoulement s'arrête, ce qui est évident *à priori*. Or, on peut désirer que cet écoulement se fasse avec une vitesse constante.

Siphon à écoulement constant.



Pour cela, on emploie le siphon à flotteur et à contre-poids. La petite branche traverse un liége qui flotte au niveau du liquide, et la partie SC

est maintenue horizontale au moyen d'un appendice SB qui contre-pèse la matière SCD. A mesure que le niveau s'abaisse, le liége descend avec lui; donc aussi le point a et toute la partie aD de la longue branche. Il est aisé de reconnaître que aD est toujours situé entièrement au-dessous du niveau, et, par conséquent, que la différence des deux colonnes reste la même. Donc la vitesse d'écoulement ne variera pas; de plus, par suite de la disposition de l'appareil, le vase pourra se vider entièrement. Nous verrons plus loin des applications de chutes d'eau avec vitesse constante; le siphon flotteur peut être très-commode à appliquer dans ces cas.

Les enfants exécutent de petits siphons avec des chalumeaux de paille, qu'ils engagent par couples dans des noyaux de cerise ou d'abricot vidés de leur amande; ces cavités remplacent la courbure des tubes, qu'on ne peut exécuter avec des tuyaux de paille.

On fait des siphons à *jet d'eau*, d'après un système tout à fait analogue. Deux tubes inégaux, dont le plus court plonge dans un liquide, débouchent dans une éprouvette VS. Si l'on aspire par l'extrémité B l'air renfermé dans l'éprouvette, on produira d'abord un jet, d'après les principes ordinaires, et l'eau résultant du jet s'écoulera par la longue branche en B. Siphon à jet d'eau.

140. Un genre de siphons fort curieux, est celui des *siphons capillaires*, qu'on exécute au Siphon capillaire.

moyen d'une mèche de coton ou de quelques brins de charpie qu'on met à cheval sur le bord d'un verre plein, l'extrémité extérieure de la mèche descendant au-dessous du niveau du liquide dans le vase. La mèche s'imbibe entièrement par l'effet de la capillarité, et l'eau se portant à l'extrémité *a*, s'y change lentement en gouttes; de temps en temps une goutte, devenue suffisamment pesante, tombe dans un vase et va se trouver remplacée par une nouvelle goutte. Si l'on fait le vase assez large pour que le niveau du liquide ne change pas sensiblement dans un temps assez considérable, ce qui est facile, vu les petites quantités d'eau qui en sortent par gouttes, la chute de celles-ci se fera par intervalles égaux. Si le vase dans lequel on reçoit les gouttes est un tube étroit terminé en haut par un entonnoir, des longueurs égales de ce tube seront remplies en temps égaux, et au moyen d'une division du tube en parties égales, cet appareil pourra servir d'horloge. Ce serait assurément la plus économique des horloges, et ce ne serait pas la plus mauvaise.

141. Les instruments connus sous le nom de *vases de Tantale*, et dont les escamoteurs tirent si bon parti, ne sont autre chose que des siphons cachés dans l'intérieur des vases, et qui s'amorcent d'eux-mêmes par la loi du niveau.

Vases de Tantale.

Soit un verre à pied dans lequel est engagé le siphon *a o b*. Si l'on verse de l'eau dans le vase, le liquide s'élèvera naturellement dans la partie *a o*

du tube; et si l'on continue à verser, le niveau extérieur dépassera le point *o*, d'où il résultera que le liquide s'engagera entièrement dans le tube, et descendra en *b*. Il s'écoulera donc sans ouverture apparente, et sans que les spectateurs comprennent qu'un peu d'eau, ajoutée à celle qui existe déjà, puisse déterminer un écoulement par le pied.

Un appareil de ce genre a reçu une application plus sérieuse. Un siphon semblable en maçonnerie a été établi dans la grande retenue d'eau du canal du Languedoc. Dans l'état normal, les eaux restent au-dessous de l'ouverture du siphon; mais quand par l'abondance des pluies, les eaux se sont élevées au-dessus de l'étiage, le siphon se trouve amorcé, comme nous l'avons expliqué ci-dessus, et les eaux surabondantes s'écoulent. L'effet de cette évacuation est de ramener le niveau au-dessous de l'ouverture *a* du siphon, et dès lors l'écoulement cesse. On voit donc que le niveau sera entretenu constant, ou du moins qu'il ne dépassera jamais d'une manière fixe une hauteur donnée.

La seconde espèce de vase de Tantale, et celle qui doit spécialement porter ce nom, est représentée par la figure ci-contre. Si on emplissait entièrement le vase de liquide, dès que le niveau aurait atteint le point *o* extrémité supérieure de la cloison *ho*, le liquide enfilerait le conduit *ch*P, qui est la longue branche d'un siphon, dont la plus

courte est *ho*, siphon qui s'est amorcé, comme dans le cas précédent, par la seule loi du niveau. Jusqu'ici cet appareil se confond avec celui que nous venons de décrire. Mais au lieu de pousser l'épreuve jusque-là, le charlatan n'emplit pas entièrement le verre, et appliquant sa bouche au point *a*, du côté duquel il incline le vase, il boit sans aucune difficulté. Le remplissant de nouveau, mais toujours au-dessous du point *o*, il le présente à l'un des assistants en l'invitant à boire, mais il le présente de telle sorte que celui-ci applique sa bouche vers la partie *bc*. Le vase étant incliné de ce côté-là, le liquide passe par-dessus le point *o*, et enfile la branche *chp*; de sorte qu'au lieu d'entrer dans la bouche du buveur, il s'écoule dans sa manche par le pied du vase. Sauf cette désagréable particularité de plus, le patient de cette expérience se trouve dans le même cas que le malheureux roi de Phrygie, jusqu'à la bouche duquel l'eau s'élevait, mais sans jamais y entrer; voilà pourquoi cet appareil trompeur est appelé *vase de Tantale*. Toutefois, il est facile de voir qu'on pourrait employer le précédent de la même manière, seulement le mécanisme n'en pourrait être aussi bien caché.

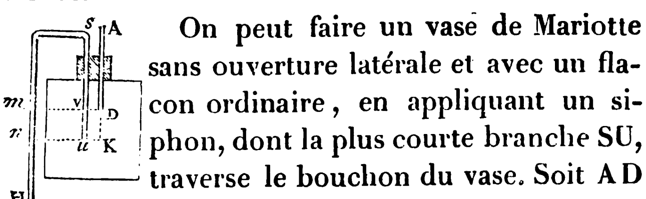
142. Nous avons montré comment, au moyen du siphon flotteur, on pouvait produire une chute d'eau avec vitesse constante; mais on parvient beaucoup mieux au même but par le *vase de Mariotte*.

Vase de Mariotte. Soit un flacon dont le bouchon est traversé par

un tube droit A D, plongeant en partie dans l'eau dont le flacon est entièrement rempli. Sur la paroi latérale, et au-dessous de D, est une ouverture *o*, par laquelle l'eau peut s'écouler. Dès que le vase a été rempli, l'orifice *o* bouché provisoirement, on applique le bouchon et le tube droit dans lequel monte le liquide par l'effet du refoulement. Si l'on applique le doigt en A, et qu'on débouche l'orifice *o*, l'écoulement n'aura pas lieu d'abord, parce que la pression de l'air en *o* soutiendra le liquide; mais dès qu'on débouchera A, l'écoulement se produira, attendu que les deux pressions atmosphériques en A et en *o* se neutralisant, le liquide sera abandonné à son propre poids. On le verra d'abord descendre en D dans le tube; puis à mesure qu'il s'écoulera par *o*, des bulles d'air entreront pour le remplacer par l'extrémité D. Or, tant que l'écoulement aura lieu, et que le niveau du liquide dans le vase n'aura pas en s'abaissant atteint l'extrémité D, la vitesse d'écoulement sera constante. Quand D sera découvert, l'eau continuera à s'écouler, mais avec une vitesse décroissante, jusqu'à ce que le niveau atteigne l'orifice; alors l'écoulement s'arrêtera tout à fait. Il est facile de reconnaître que la pression atmosphérique en D, triomphe de celle qui s'exerce en *o* avec un excès de force représenté par le poids de la colonne liquide DK. Celle-ci conserve sa hauteur, tant que le niveau du liquide ne s'est pas abaissé au-dessous de D; la vitesse

d'impulsion qu'elle détermine en o reste donc constante comme la hauteur et le poids de cette colonne; elle est égale à $\sqrt{2g.DK}$. Il en est autrement quand le niveau est descendu au-dessous de D : la hauteur de la colonne liquide va en décroissant jusqu'à zéro, et la vitesse d'écoulement qu'elle détermine suit exactement les mêmes phases.

On peut donc, en disposant convenablement les dimensions du vase et de l'orifice, ainsi que la position du tube, non-seulement produire une vitesse constante d'écoulement, mais se donner à volonté cette vitesse, et le temps pendant lequel doit avoir lieu cet écoulement. Soit h la longueur DK, on a... $v=\sqrt{2gh}$... d'où $h=\frac{v^2}{g}$. Soit d le diamètre de l'orifice, D celui du flacon, et H la longueur DU, on aura $\pi d^2 v=\pi d^2 \sqrt{2gh}$ pour le produit de l'écoulement pendant une seconde, et $\pi D^2 H$ pour le volume à écouler; donc si le temps d'écoulement doit être t secondes, on aura $t=\frac{D^2H}{d^2\sqrt{2gh}}$, d'où étant donnés D et d, on tirera h, ce qui déterminera la position du tube. Toutefois, il faut tenir compte de la contraction de la veine liquide en o, qui réduit d'un bon tiers le produit de l'écoulement par cet orifice.

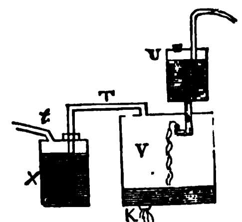


On peut faire un vase de Mariotte sans ouverture latérale et avec un flacon ordinaire, en appliquant un siphon, dont la plus courte branche SU, traverse le bouchon du vase. Soit AD

le tube droit, au point u de la courte branche du siphon, s'exerce une pression représentée par le poids de la colonne D K, ou mn; mais en n agit une autre pression égale à la différence nH des deux colonnes liquides du siphon; donc enfin en H, il y a une pression égale à mH, abstraction faite des deux colonnes atmosphériques qui agissent en A et en H, et qui s'élident. Donc en H il y aura écoulement avec vitesse constante, vitesse qui aura pour mesure $v = \sqrt{2g.mH}$; et l'écoulement continuera jusqu'à ce que le niveau soit descendu en H, ou simplement en u, si H est audessous de ce dernier point.

143. Nous signalerons trois applications particulières du vase de Mariotte.

La première consiste à faire écouler les gaz avec une vitesse constante, dans des appareils désignés sous le nom de *gazomètres*. Soit le vase U rempli d'un gaz qu'on veut faire passer d'une manière uniforme dans le vase x, pour le soumettre à une épreuve quelconque. Dans le vase V tombera, avec une vitesse constante, l'eau d'un vase de Mariotte U; or, des volumes égaux de liquide chasseront en temps égaux des volumes égaux de gaz qui passeront dans le vase x.



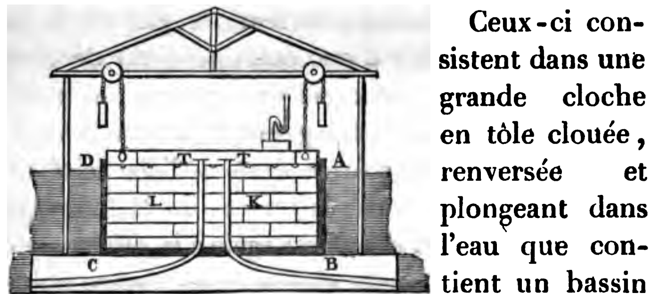
Si le gaz soumis à l'expérience doit être sec, on l'enfermera dans une vessie qu'on placera dans le vase V; à la vessie sera fixée le conduit T, qui sert au transvasement, et l'air qui l'environne sera en- Gazomètres.

fermé entre l'eau et les parois du vase, sans aucune communication avec l'extérieur. A mesure qu'il entrera de l'eau, l'air sera refoulé et condensé, il pressera donc sur la vessie et fera fuir le gaz; or, il est facile de reconnaître qu'en des temps égaux, et par l'intermédiaire de l'air ambiant, la vessie subira d'égales réductions de volume, et que des volumes égaux de gaz seront chassés.

On peut dans cet appareil faire circuler des volumes de gaz très-supérieurs au volume du vase V, et pour ainsi dire indéfinis; pour cela on le fait agir comme appareil d'aspiration de la manière suivante. Veut-on mesurer sur une grande échelle la quantité de gaz acide carbonique contenue dans l'air, le vase V sera d'abord rempli d'air atmosphérique, et chassé par le moyen précédent dans le vase x rempli d'une dissolution concentrée de potasse qui absorbera l'acide, en laissant sortir l'air. Quand le vase de Mariotte sera vide d'eau, et le vase V rempli par ce liquide, résultats qu'on peut rendre simultanés par l'égalité des deux vases, on ouvrira une issue à l'eau de V, et cet écoulement amènera dans ce vase l'air que contient celui de Mariotte: ce sera l'effet de l'air entrant dans le vide; puis on remplira d'eau le vase de Mariotte, et l'on recommencera l'opération. On saura donc quel volume d'air aura formé le carbonate de potasse qui se trouvera dans le vase x, d'où l'on conclura la quantité d'acide carbonique recueillie. Quand on opère sur l'air, ce gaz pourrait rentrer par toute autre voie que par l'aspiration de

celui que contient le vase de Mariotte; mais si l'on opère sur tout autre gaz, dans le réservoir duquel débouche le tube *z*, l'aspiration se fera toujours comme nous venons de le dire. Le gaz du vase de Mariotte, et l'air atmosphérique qui presse à l'orifice *k*, se font équilibre; l'eau sort donc en vertu de son seul poids, sans que l'air tende à rentrer en *o*; or le vide que laisse la première goutte d'eau écoulée est nécessairement comblé par le gaz supérieur qui communique directement avec ce vide.

144. Les gazomètres que nous venons de décrire ne sont pas ceux qui servent à distribuer le gaz d'éclairage, aujourd'hui si répandu, et dont l'écoulement et la répartition exigent essentiellement une grande régularité.



Gazomètre de l'éclairage.

Ceux-ci consistent dans une grande cloche en tôle clouée, renversée et plongeant dans l'eau que contient un bassin creusé en terre, et d'un diamètre un peu plus considérable. Sous cette cloche, remplie d'eau en très-grande partie, se trouve le gaz, qui surmonte l'eau comme dans une éprouvette, et dans la partie occupée par le gaz débouchent deux tuyaux T, T', dont le premier amène le gaz des cornues de fonte, dans lesquelles on distille la houille; et le

second lui donne issue dans les divers tubes de conduite par lesquels il est distribué. La cloche est suspendue par des chaînes et équilibrée, à peu de chose près, par des contre-poids; la longueur et le volume des chaînes sont calculés de telle sorte que si la cloche remonte, par exemple, ce qui lui fait déplacer un moindre volume d'eau et perdre moins de son poids, ou, ce qui revient au même, peser davantage, la portion de chaîne qui passe du côté du contre-poids fait justement équilibre à cet excès du poids que prend la cloche; l'équilibre a lieu de la même manière dans les descentes, et en général dans toutes les positions de la cloche. On introduit du gaz sous la cloche, de manière à abaisser le niveau de l'eau à l'intérieur de 55 millimètres au-dessous du niveau extérieur; le gaz est donc pressé par le poids d'une colonne d'eau de cette hauteur, et c'est cet excès de pression qui le fait sortir par le tuyau de dégagement. La différence de niveau, qui est une force égale à l'élasticité du gaz intérieur, est aussi la mesure de la force qui soulève la cloche, et qui est égale à la différence δ entre le poids de cette cloche et les contre-poids qui lui font équilibre. Or, la différence de niveau ne varie pas; car, à mesure que le gaz s'échappe, l'eau remonte à l'intérieur, la moindre différence des niveaux correspond à une moindre tension du gaz; donc ce gaz ne pousse plus la cloche de bas en haut avec la même énergie; donc celle-ci doit descendre et entrer dans l'eau, ce qui com-

prime le gaz, et lui rend sa tension jusqu'à la valeur primitive δ, car ce n'est qu'à cette condition que l'équilibre peut se rétablir. Donc la tension et la différence des niveaux se rétabliront aussi, ou plutôt cette réaction devant se produire à chaque instant, la différence des niveaux ne sera pas altérée.

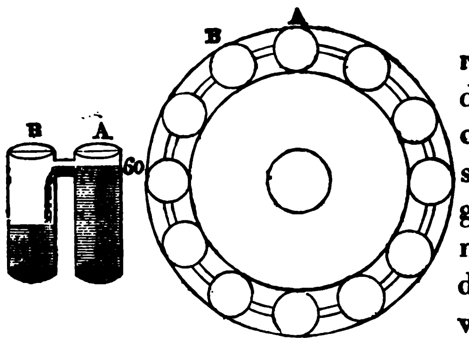
Tant qu'il y a du gaz dans celle-ci, sa réaction maintient la différence de niveau ; et lorsque tout le gaz est expulsé, on en introduit une nouvelle quantité : ceci suppose que la distillation a été interrompue. En *m* se trouve un tube analogue aux tubes de sûreté en S, et contenant de l'eau colorée ; il y a dans les deux branches des colonnes de liquide inégales, et dont la différence de niveau est précisément égale à celle des niveaux en dedans et en dehors de la cloche, comme on le reconnaît aisément. C'est l'inspection de ce manomètre qui avertit de l'état de tension du gaz. Quand le niveau s'établit entre les deux colonnes du manomètre, on reconnaît que le gaz est entièrement épuisé.

La vitesse avec laquelle le gaz s'écoule est $V = \sqrt{2g.55}$; combinée avec la section du tube d'écoulement, elle fournit la dépense du gaz dans un temps donné.

145. Une seconde application du vase de Mariotte consiste à remplir en temps égaux des volumes égaux d'un vase quelconque, qu'on peut supposer un tube calibré et divisé en longueurs égales, ce qui permettrait de mesurer le temps

par la correspondance du niveau avec tel ou tel numéro de la graduation. On aurait ainsi une *clepsydre* très-exacte. Voici l'horloge à eau telle que nous la proposerions.

Clepsydre.



Douze verres de même diamètre et de capacité égale seraient rangés circulairement, et l'un d'eux, A, recevrait d'abord l'eau qui s'écoule d'un grand vase de Mariotte. Ce verre serait divisé sur sa hauteur en 12 parties égales, dont chacune serait emplie en cinq minutes; on peut même concevoir 60 divisions. Arrivée à 60 minutes, l'eau rencontrerait un tube latéral de communication avec le second vase B, tube légèrement incliné vers B, et d'une section plus grande que l'orifice d'écoulement du réservoir. L'eau qui entrerait dans A, après les 60 minutes, s'écoulerait tout entière par ce tube dans le vase B pendant les 60 minutes suivantes; celui-ci plein, l'eau qui tomberait toujours dans A passerait, en vertu de la loi de niveau, dans le vase C, et ainsi de suite. L'horloge étant montée à midi, c'est-à-dire le vase de Mariotte commençant à fonctionner à cette heure, on reconnaîtrait au nombre de vases pleins combien il s'est écoulé d'heures depuis midi, et, par la hauteur de l'eau dans le vase

en fonction actuelle, on saurait combien il y a de minutes excédantes. On aurait donc, par un simple coup d'œil, l'heure et la minute.

Avec un double système de verres, on aurait une horloge à 24 heures. Le dernier verre aurait un siphon débouchant dans un vase séparé, de telle sorte que si l'horloge n'était pas remontée au bout des 24 heures, l'eau excédante renversée dans les verres lors du remontage donnerait encore l'heure écoulée depuis l'achèvement du cycle de 24 heures. Remonter l'horloge, ce serait remplir le vase de Mariotte et vider tous les verres, ce qui prendrait un temps assez court, dont il serait facile de tenir compte. On conçoit qu'il serait très-facile de régler la grandeur relative et la disposition des diverses parties de l'appareil, pour le rendre à la fois exact et commode. La précision de ses indications serait nécessairement altérée par l'évaporation du liquide, et les effets de la dilatation, éléments qui varieraient tous deux avec la température, mais dans des limites qui ne seraient sans doute pas plus larges que celles qui concernent les horloges à mécanisme métallique, et dont il serait peut-être facile de tenir compte, si l'on mettait sérieusement ce système à exécution.

Les anciens se servaient d'horloges à eau, et l'on cite particulièrement la fameuse clepsydre de Ctésibius, à Rome. L'eau tombait des yeux d'une statue dans un bassin, où flottait une petite figure armée d'une baguette. A mesure que le bassin

s'emplissait, le petit flotteur s'élevant, sa baguette se promenait le long d'une colonne sur laquelle étaient marquées les heures. Il ne paraît pas que les Romains aient tenu compte de la variation de vitesse dans la chute de l'eau, par suite de l'abaissement de niveau dans le réservoir, du moins les auteurs ne signalent aucun moyen employé pour remédier à cette altération. Mais il est assez probable que le fait ne leur avait pas échappé, et qu'ils avaient gradué leur colonne des heures expérimentalement, avec un cadran solaire, par exemple, de manière à ce que les indications horaires successives, quoique séparées par des volumes inégaux de liquide, le fussent par des intervalles de temps égaux.

146. Une troisième application remarquable du vase de Mariotte est offerte par le système des lampes dites *hydrostatiques* ou de Thilorier.

Lampe hydrostatique.

Le réservoir *mn* et le tube *op* qui descend au-dessous sont remplis d'une dissolution très-dense de *sulfate de zinc*; il en est de même du petit vase *tpq*; tout le reste de l'appareil, y compris le tube *vx*, est rempli d'huile. La colonne *zx* de ce dernier liquide est équilibrée par la colonne *ot* de sulfate, qui est plus dense et plus courte. La partie *tp* est soutenue dans le vase *qp* par la loi de niveau, et il en faut faire abstraction. L'appareil supérieur étant un vase de Mariotte, la vitesse de chute en *t* est dé-

terminée par le poids constant de la colonne comprise entre les points *o* et *t* ; or, la vitesse de la chute se transforme en pression ; donc, au point *t* presse le poids constant de cette colonne, qui doit soutenir un poids d'huile aussi constant, ou, ce qui revient au même, une colonne d'huile de même hauteur ; donc, toujours l'huile se soutiendra jusqu'au point *x*, et l'on aura un niveau constant dans la lampe. A mesure que l'huile se consume en *x*, ce qui retranche une petite portion de la colonne et la rend plus légère, la pression de la colonne *or* devient dominante ; alors une certaine quantité du sulfate du petit vase *pq* en sort et tombe en *tu* dans la caisse principale, ce qui relève nécessairement la surface de séparation des deux liquides, et refoule l'huile dans le tube *vx* ; la colonne d'huile reprendra donc la hauteur qui lui est nécessaire pour équilibrer la colonne constante de sulfate de zinc, ou, en d'autres termes, l'huile s'élèvera constamment au point *x*, et le niveau restera fixe en ce point. Le sulfate qui sort de la petite caisse est remplacé par du liquide que cède la colonne *ot* ; mais celle-ci en reprend au vase supérieur. On voit donc que le niveau de l'huile restera constant tant qu'il y aura du sulfate dans le vase *mn* au-dessus du point *o*. La quantité d'huile, qui pourra brûler tout d'un trait, est donc égale au volume de sulfate qui garnit le vase *mn* au-dessus de *o*. Tout l'appareil est renfermé dans une enveloppe qui forme le corps extérieur de la lampe.

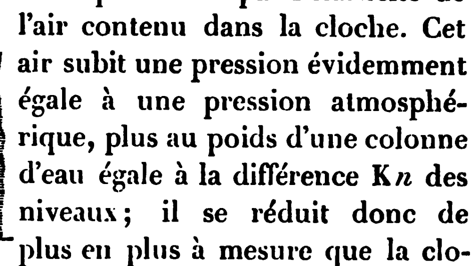
Pour remplir celle-ci, on adapte au bec en x un entonnoir par lequel on verse l'huile, en même temps qu'on retire le bouchon s, qui ferme en haut le vase de Mariotte. Le niveau ne pouvant s'établir en x pour la colonne d'huile zx, à moins que cette colonne ne soit équilibrée par une autre partant du point o, il en résultera évidemment un refoulement de la colonne de sulfate de zinc, d'abord vers le point o, au-dessous duquel elle est un peu descendue, puis dans la capacité du vase mn, parce que l'entonnoir placé en x contenant encore une certaine colonne d'huile au dessus du point x, il faudra, pour l'équilibre, que le liquide arrivé en o s'élève encore davantage. Or, il ne saurait s'élever dans le tube os sans s'élever aussi, en vertu de la loi du niveau, dans le vase qui l'entoure, et il est aisé de reconnaître que ce sera le sulfate du vase pq qui fournira à cette ascension. Quand l'huile de l'entonnoir ne descend plus, on remet le bouchon et on retire l'entonnoir; le premier effet de cette manœuvre est de rendre prédominante la pression du sulfate et d'amener un écoulement de l'huile en x; puis la lampe fonctionne comme auparavant. Si on ne replaçait pas le bouchon, le niveau du liquide dans le vase de Mariotte descendrait immédiatement en o, ce qui détruirait tout l'effet qu'on attend de cet appareil; de plus, l'huile sortirait immédiatement par le bec en quantité égale à celle du liquide mno.

Nous allons encore décrire successivement di-

vers appareils dont le jeu est fondé sur la pression de l'air.

147. La *cloche à plongeur* est une vaste cloche qu'on enfonce sous l'eau dans une position renversée, ce qui exige un certain poids dans le corps de l'appareil. L'eau n'y pénètre qu'à une petite hauteur, repoussée qu'elle est par l'élasticité de

Cloche à plongeur.



l'air contenu dans la cloche. Cet air subit une pression évidemment égale à une pression atmosphérique, plus au poids d'une colonne d'eau égale à la différence K*n* des niveaux; il se réduit donc de plus en plus à mesure que la cloche s'enfonce et son élasticité augmente à proportion. Si le niveau intérieur *mn* est à 3 mètres sous l'eau, l'air supporte $10,4 + 3 = 13^{m},4$... et son volume inverse sera $\frac{10,4}{13,4} = 0,776$ du volume de la cloche, mais sa tension sera 1,288 comparée à la pression normale prise pour unité. Elle donnerait une colonne barométrique de 98 centimètres.

Dans l'espace occupé par l'air se trouvent des planchers sur lesquels s'appuient des hommes qui travaillent sous l'eau. Ces travailleurs supportent une pression très-considérable qui rend très-pénible leur séjour dans ce lieu; on ne saurait sans danger les y soumettre brusquement; aussi abaisse-t-on la cloche avec d'autant plus de lenteur qu'elle doit descendre plus bas. Mais, outre l'inconvénient d'une pression trop forte, l'air emprisonné dans la cloche offre encore celui

d'une viciation rapide : la respiration des travailleurs et la combustion des lampes l'ont bientôt désoxygéné, et remplacé par un mélange gazeux impropre à entretenir la combustion et la vie. Pour remédier à ce mal on applique à la cloche un tube de cuir *n*KS, au sommet duquel est adaptée une pompe foulante; en S se trouve une soupape qui ouvre de dehors en dedans. Lorsqu'on veut renouveler l'air intérieur, on fait agir la pompe foulante qui introduit de l'air neuf et frais; le mélange des deux airs emplit la cloche, repousse l'eau inférieure jusqu'aux bords de l'appareil, et sort par portions successives aussi longtemps qu'agit la pompe foulante. Ainsi l'air vicié est balayé au-dessous et sort en remontant à travers l'eau; l'air qui reste après l'opération est un mélange dans lequel domine l'air frais, et qu'on renouvellera bientôt à son tour.

Lampes quinquets.

148. Le système des lampes ordinaires dites *quinquets*, se compose d'un premier vase A*mn*, à tube latéral recourbé, *an;* on verse au fond de ce vase une couche d'huile qui s'établit de niveau dans le tube jusqu'à son orifice en *n*. Puis on remplit d'huile la bouteille métallique V*a*, qu'on renverse, et qu'on place dans le vase A*m*. Lorsqu'on la retourne, elle se trouve bouchée par la plaque à tige *b*, et l'huile ne tombe pas; mais par l'effet de son insertion dans le vase A*m*, la tige *ab* butte contre le fond, ce qui relève la plaque et débouche le vase V; mais le goulot

étant engagé dans l'huile inférieure, l'huile supérieure ne tombe pas, retenue qu'elle est par la pression atmosphérique. Supposons qu'on ôte ou qu'il se consomme une partie de l'huile contenue dans le bec *nu*, le niveau *mn* descendra; mais l'effet de cet abaissement sera de découvrir l'orifice du goulot *a;* alors il entrera dans la bouteille V une bulle de l'air ambiant, cette bulle chassera un petit volume de liquide qui remplacera l'huile consommée et ramènera le niveau *mn* à la hauteur de l'orifice du bec. Dans tous les cas, la tension de l'air intérieur plus la colonne d'huile au-dessus de cet orifice feront équilibre à une pression atmosphérique.

Il existe une foule de petits appareils, et particulièrement des encriers, qui sont établis sur ce principe. A mesure que le liquide est consommé à l'ouverture du vase, le niveau descend dans ce vase, et l'air intérieur se dilate; sa tension devenant moindre par cela même, ne saurait équilibrer la pression extérieure, et le niveau du liquide est toujours plus haut dans l'intérieur du vase que dans le bec. Si le vase avait été primitivement rempli, le bec se viderait sans que le niveau s'abaissât à l'intérieur, puisqu'il en résulterait un vide dans lequel la pression atmosphérique pousserait le liquide; mais le bec vidé, l'air entrera par la bulle, et les choses se passeront dès lors comme dans le cas précédent. Dans l'un et l'autre cas, on aura un réservoir considérable de liquide qui présentera à la con-

sommation une très-étroite colonne, et perdra ainsi fort peu par l'évaporation.

Fontaine intermittente.

149. La *fontaine intermittente* se compose d'un récipient sphérique A, qu'on remplit d'eau par la tubulure B, et que traverse un tube *c*K qui lui sert de support. L'orifice supérieur du tube est toujours élevé au-dessus de l'eau, et vers l'extrémité inférieure K qui est bouchée, se trouve une échancrure *o*, par laquelle l'air circule à l'intérieur entre *o* et *c*. À la hauteur *ab*, le récipient porte deux robinets par lesquels l'eau s'échappe, en tombant dans la cuvette V*u*. Il en résulte dans le récipient un abaissement de niveau, et par suite un vide relatif au-dessus; mais l'air rentre par l'échancrure *o* et va combler ce vide. La cuvette V*u* continuant à recevoir de l'eau, le niveau de celle-ci ne tardera pas à atteindre l'échancrure *o*, et même à la dépasser; ce qui interceptera la communication entre le récipient et l'air extérieur Dès lors, l'air du récipient se dilatera à mesure que le niveau s'abaissera au-dessous de lui; et son élasticité diminuant par l'effet de sa dilatation, il viendra un moment où cette élasticité plus le poids de la hauteur d'eau qui restera, seront équilibrés par sa pression extérieure. Alors l'écoulement par les robinets s'arrêtera. Mais en même temps que l'eau tombait des robinets dans la cuvette, elle s'écoulait de celle-ci dans un vase situé au-dessous, mais par une ouverture *u* qui enle-

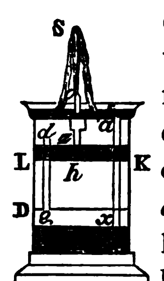
vait moins d'eau que les deux robinets n'en donnent, ce qui permettait à l'eau de s'élever dans la cuvette jusqu'au-dessus de l'échancrure. Mais l'écoulement des robinets s'arrêtant et la cuvette ne recevant plus rien, tandis qu'elle continue à perdre, l'échancrure ne tardera pas à être découverte par suite de l'abaissement du niveau; dès lors, l'air rentrera dans le récipient, et les choses étant remises dans l'état primitif, l'écoulement recommencera. Il y aura donc des intermittences ou périodes d'écoulement et d'arrêt, d'où cet appareil a pris son nom.

Il existe dans la nature des sources intermittentes, dont les phénomènes peuvent se rapporter à une théorie analogue. Toutefois, on les explique dans un système différent et plus probable, fondé sur un jeu de siphon naturel, analogue au siphon artificiel du canal de Languedoc. Là, le déversement des eaux qui dépassent l'étiage donne lieu évidemment à des intermittences, lesquelles se règlent d'ailleurs sur l'abondance ou la rareté des pluies.

150. La *fontaine de Héron* est un très-joli appareil, qui a reçu des applications utiles et donne lieu à des jeux très-agréables. Son nom lui vient de son inventeur, physicien grec d'Alexandrie dans le Ier siècle avant notre ère. Héron est également cité pour ses expériences sur la vapeur.

Fontaine de Héron.

La fontaine de Héron présente un bassin *c* dans lequel il suffit de verser de l'eau pour qu'il s'en

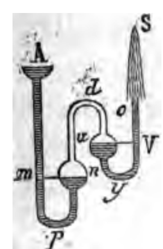


élève un jet. L'eau versée par la cuvette *c* tombe par le tube *ab* dans un réservoir *b*, d'où elle chasse l'air qui est forcé d'enfiler le tube *gd*, et se condense dans un réservoir supérieur *ad* où l'on a mis de l'eau d'avance. La condensation de cet air refoule l'eau dans le tube *ho* par lequel elle s'échappe en jet, à une hauteur déterminée par la tension de l'air condensé en *ad*.

Cette hauteur et la durée du jet peuvent se déterminer par la mesure des diverses parties de l'appareil.

En effet, on reconnaît d'abord que l'air du récipient inférieur supporte une pression normale en C, plus le poids de la colonne d'eau C*x*; cette somme est donc la mesure de sa tension. Or, cette tension étant nécessairement uniforme dans toute la masse, telle est aussi la mesure de la pression exercée par l'air en *ad*, sur l'eau qu'il refoule dans l'ajutage. Mais là, cet air supporte une pression normale en *o* plus le poids de la colonne liquide *zs*; donc celle-ci est nécessairement égale à C*x*. On peut donc donner au jet une hauteur voulue. Il est à remarquer qu'à mesure que l'eau emplit le récipient inférieur et diminue la longueur C*x*, l'air chassé abaisse d'autant le niveau dans le récipient supérieur; or, la colonne supportée ne pouvant devenir plus haute, et même devant diminuer, le jet s'abaissera en proportion, et la mesure formulée ci-dessus se maintiendra exactement.

L'eau du jet retombant dans la cuvette passera de là dans le récipient inférieur, et il est aisé de reconnaître que le jet durera toujours de la même manière jusqu'à ce que le niveau de l'eau dans le récipient *ad* atteigne en s'abaissant l'orifice inférieur *h* de l'ajutage; alors le jet d'eau s'arrêtera, et sera remplacé par un jet d'air pendant quelques secondes. Le volume d'eau en *ad* étant donné, ainsi que la vitesse de sortie du jet, qui est égale à $\sqrt{2gh}$ (h étant la hauteur Cx), on en conclura le temps théoriquement nécessaire pour épuiser le réservoir *ad*; mais les frottements et la résistance de l'air modifieront ce résultat.



On fait une fontaine de Héron d'un système très-simple avec un double tube en S, où le liquide se trouve disposé comme le montre la figure ci-contre. On introduirait d'abord de l'eau dans la branche *uvo*; cette eau s'y mettra de niveau dans les deux parties du tube, mais on inclinera l'appareil du côté de l'orifice *o*, jusqu'à ce que le liquide atteigne cet orifice; on le bouchera alors avec le doigt, et redressant l'appareil, on aura les deux colonnes inégales *oy*, *uy*; versant ensuite de l'eau dans l'entonnoir A, on emprisonnera de l'air entre les deux boules, et au besoin on en introduirait par insufflation. L'air condensé dans cet intérieur pourra soutenir, outre une pression atmosphérique normale, une colonne d'eau Am, qui sera la colonne Cx de la figure précédente; mais en vertu de la même ten-

sion, il soutiendra en *o*, outre une pression normale, celle d'une colonne d'eau qui devra être égale à A*m*. Donc en O il se produira un jet OS tel, qu'on aura $OS + ov = Am$. En inclinant légèrement l'ajutage, on pourrait faire rentrer l'eau du jet dans l'entonnoir pour entretenir l'action. Celle-ci durera d'ailleurs jusqu'à ce que l'eau *uy* soit épuisée. Si l'eau n'est pas reversée dans l'entonnoir, la colonne A*m* ira en décroissant, et il en sera de même du jet.

On voit que dans la fontaine de Héron, la vitesse et par suite la hauteur du jet ne dépendent que de la longueur de la colonne C*x* (fig. I); et par conséquent il n'y a pas lieu de considérer la largeur du tube. De là naît un paradoxe assez singulier. Si le tube, au lieu d'avoir un centimètre carré de section, en avait quatre, par exemple, il est clair qu'il entrerait par là en une seconde 4 fois plus d'eau dans le récipient inférieur; l'air y serait 4 fois plus vite réduit à un même volume; sa pression sur l'eau en *ad* serait 4 fois plus rapide; d'où il semble résulter que la vitesse du jet serait 4 fois plus considérable, et par conséquent sa hauteur plus considérable aussi; cependant, dit-on, elle ne saurait dépasser C*x*.

La solution de cette difficulté se trouve dans l'application du principe des vitesses virtuelles. Avec une section 4, l'eau du tube de descente réduira 4 fois plus vite l'air *xg* à un certain volume, et celui-ci fera descendre le niveau *ad* de 4 centimètres au lieu de 1 centimètre dans le

même temps. Donc cette eau sera poussée dans l'ajutage 4 fois plus vite; or, ici le poids de la colonne ainsi poussée est la résistance, et le chemin quadruple qu'elle tend à faire est une vitesse virtuelle avec laquelle elle réagit contre la puissance; donc ici la réaction sera égale à l'action, et l'effet de la multiplication de la colonne par 4 sera élidé.

151. Le système de la *fontaine de Héron* a été appliqué d'une manière utile et intéressante à la construction des lampes de Thoyot qui ne contiennent que de l'huile et sont assez généralement employées.

Lampe de Thoyot.

L'appareil se compose de trois réservoirs, dont l'un AB est un vase de Mariotte. Si l'on verse de l'huile dans celui-ci, le système tout entier des réservoirs et des tubes sera bientôt rempli de ce liquide. On ferme alors hermétiquement l'ouverture A, et l'on renverse l'appareil dans une burette à huile. Là s'écoule tout le liquide contenu dans le réservoir V et les tubes *za*, *og*; les réservoirs AB, *mn*, restent seuls pleins d'huile, et le réservoir V se trouve occupé par de l'air qui est venu y remplacer le liquide primitif. On remet alors la lampe sur pied. Les deux pressions atmosphériques en *t*, *g* se font équilibre; la colonne d'huile *uv* presse sur le fond de la petite cuvette *v* qui se remplit, et se déverse dans le réservoir V, où ce liquide refoule et condense l'air. Faisons d'a-

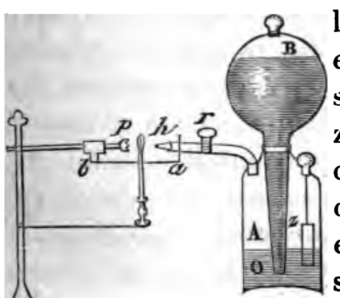
bord abstraction de ce déversement. L'air du réservoir V est sous la pression d'une colonne uv, et telle est par conséquent aussi la pression en a. Comme la pression est essentiellement la même dans tous les points d'une couche liquide horizontale, la pression à l'orifice o du tube og a donc aussi pour mesure le poids de la colonne uv; donc une colonne $og = uv$ sera soutenue dans ce tube. Supposons que le point g soit l'orifice du bec de la lampe, la mèche se trouvera convenablement baignée d'huile.

Or, par l'effet de la combustion, la colonne og diminuera ; la pression deviendra donc moindre en o, et par suite en a, où elle devra être la même; donc l'élasticité de l'air deviendra moindre aussi dans le vase V, où elle équilibrait une pression atmosphérique, plus la colonne uv. Pour que l'équilibre se rétablisse, il faudra qu'il passe de l'huile de la cuvette v dans le réservoir V, de manière à rendre à l'air sa tension en le condensant; et comme cette tension devra être telle qu'elle supporte une pression normale plus la colonne constante uv, la nouvelle tension sera nécessairement égale à la primitive; donc les faits primitifs se reproduiront, et la colonne og remontera à son niveau. Nous aurons donc encore un niveau constant et d'une élévation voulue. Ordinairement on donne à og un peu moins de hauteur qu'on ne peut lui en donner; de cette manière le haut de la mèche est toujours baigné d'huile et l'excédant se déverse dans le pied.

Chaque fois qu'il entre de l'huile dans le grand réservoir V (ce qui a lieu en fait d'une manière continue), l'air qui s'y condense s'échappe partiellement en bulles par l'orifice du tube courbe, et monte au-dessus du niveau de l'huile en *mn*. L'air contenu dans cette chambre a évidemment pour tension une pression normale, plus *eg*; et la pression qui agit en *o* est *eg* + *eo*, puisque ces deux portions y sont soutenues ; on peut donc supposer que la pression en *o*, au lieu de résulter directement de celle qui s'exerce en *a*, se compose de la tension de l'air en *mn*, puis du poids d'une colonne inférieure égale à *eo*; or, telle est évidemment aussi celle qui s'exerce en *a*, contre l'air du tube.

Lorsque le niveau *mn* de l'huile se sera abaissé un peu au-dessous de *o*, le liquide *og* ne sera plus soutenu, il tombera, et l'air rentrera avec lui ; il faudra alors regarnir la lampe. Ce système d'éclairage passe pour être de très-bonne qualité : il n'exige que beaucoup de soin dans la préparation et la tenue de l'appareil.

152. La *lampe à gaz hydrogène* se compose d'un flacon à deux tubulures, dans lequel plonge Lampe à gaz hydrogène.



le col d'un matras ouvert en D. Dans le flacon est suspendu un cylindre de zinc, qui plonge dans de l'eau acidulée par $\frac{1}{50}$ d'acide sulfurique ; cette eau dissout le zinc et il se dégage, comme on

sait, du gaz hydrogène. L'élasticité de ce gaz fait monter le liquide dans le matras, et quand il s'en est formé une quantité suffisante, le morceau de zinc se trouve à découvert et l'action cesse. Pour se servir de ce gaz, on ouvre un robinet *r* qui lui donne issue par un tube terminé en pointe fine. Devant cette pointe se trouve, ou un système de deux autres pointes entre lesquelles on fait éclater une étincelle électrique qui enflamme le gaz, ou, ce qui est beaucoup plus simple, un petit morceau de platine en éponge, qui a la propriété spéciale d'enflammer un jet de gaz hydrogène. La flamme ainsi formée allume la mèche d'une petite bougie, placée sur le passage du jet.

A mesure que le gaz se dégage, il se fait un vide que remplit le liquide du matras, de sorte que le cylindre de zinc plonge de nouveau, et qu'il se forme une nouvelle quantité d'hydrogène. Quand le matras n'a pas son bouchon, la pression que supporte le gaz est évidemment égale à une pression normale, plus le poids de la colonne liquide AB, et c'est en vertu de cet excès de pression qu'il s'échappe par l'ajutage. Si lorsque le gaz se forme ou se dégage, on laisse bouché le matras, la tension de l'air est modifiée de manière à repousser le bouchon, ou à empêcher de l'enlever facilement. Le liquide dissolvant le sulfate de zinc qui se forme, devient impropre à une dissolution ultérieure, et il faut le renouveler de temps en temps. La lampe à gaz hydrogène est commode pour se procurer à volonté de la lumière dans un instant.

153. Le *chalumeau de Brooks* est un vase en cuivre très-solide, dans lequel on condense, au moyen d'une pompe foulante, un mélange d'oxygène et d'hydrogène dans le rapport de 1 à 2. Le corps de pompe, au lieu de s'ouvrir dans l'air, communique avec des vessies pleines des gaz qu'on veut condenser. Lorsque le récipient est plein, on ouvre un robinet qui donne issue au mélange gazeux, et l'on enflamme celui-ci. La température que donne cette combustion est supérieure, comme on sait, à toutes celles qu'on peut produire de toute autre manière. Chalumeau.

154. Les machines pour faire des eaux gazeuses sont des pompes foulantes, dont le récipient est rempli du liquide avec lequel on veut combiner le gaz. On sait que la faculté dissolvante de l'eau augmente considérablement avec sa pression; il est donc assez facile de dissoudre plusieurs litres d'acide carbonique par exemple, dans un litre d'eau; il n'y a d'autre force à vaincre que la résistance du gaz comprimé. Eaux gazeuses.

On sait que les vins mousseux, la bière, etc., ne font effervescence que parce que l'acide carbonique qui se forme par le travail même de ces liqueurs dans la bouteille, se trouvant soumis à une pression assez considérable qui est celle du bouchon, lequel est parfois retenu par des fils de fer, est forcé de se dissoudre dans le liquide. Lorsque l'obstacle est enlevé, le gaz se débande, et sort de son dissolvant en bulles nombreuses. Quelquefois même, sa force expansive est supérieure à la

ténacité du verre, et l'on sait qu'un tiers environ du Champagne mousseux est perdu par la casse des bouteilles.

155. Les machines soufflantes destinées à aviver la combustion, sont assez variées dans leur construction. Commençons par les plus simples.

Soufflet simple. Le soufflet ordinaire à deux panneaux, est une capacité à parois extensibles, communiquant à l'extérieur par une tuyère simple *og*, et une simple soupape de cuir pratiquée dans l'un des panneaux. Cette soupape s'ouvre de dehors en dedans. Lorsqu'on écarte les panneaux du soufflet, l'air entre par la tuyère et la soupape tout à la fois; et lorsque les panneaux se rapprochent, l'air introduit sort par la tuyère seulement et est dirigé sur le feu.

Soufflet double. Le soufflet à double courant se compose de trois panneaux, dont deux sont à manche, et portent des soupapes de cuir qui ouvrent de dehors en dedans. Lorsqu'on écarte les deux panneaux, l'air entre par la soupape *s* dans la cavité qu'ils comprennent, ainsi que dans le second ventre par la soupape *d*. Quand les panneaux à manche se rapprochent, l'air poussé par ce mouvement dans le second ventre entre eux, sort en partie par la tuyère. Mais quand ces premiers panneaux s'écartent de nouveau, le troisième panneau K se rapproche de *d* dont il était écarté violemment, ce qui fait sortir encore de l'air par la tuyère du soufflet. Ainsi, le soufflet fonctionne en dirigeant

un courant sur le feu, tant pendant l'écart des panneaux à manche que pendant leur rapprochement. De cette manière, il y a courant continu, et l'action de l'instrument est plus complète.

Pompe soufflante.

On a remplacé ces simples appareils par des pompes à air, dites *machines soufflantes*, dont on se sert pour activer les hauts fourneaux où se fabrique la fonte. Dans un corps de pompe SS‴, se meut un large piston qui, en descendant, pousse devant lui tout l'air, qu'il force à passer par la soupape S‴ dans un tuyau latéral. En même temps, le vide qu'il forme au-dessus de lui est comblé par l'air extérieur qui afflue en poussant la soupape S. Lorsque le piston remonte, il pousse au-dessus de lui cet air qui enfile la soupape S″, pour passer dans un tuyau latéral qui communique avec le premier, tandis que par la soupape S′, une nouvelle quantité d'air s'introduit au-dessous du piston, pour être à son tour refoulée pendant la descente, et passer par la soupape S‴ dans le tuyau inférieur. Le piston est mû par une machine à vapeur, et il est aisé de voir qu'on peut, avec ce système très-simple, pousser rapidement sur le foyer autant d'air qu'on le voudra. Il existe de ces machines qui chassent jusqu'à plus de 300 mètres cubes d'air par minute.

On emploie aussi comme machines soufflantes divers ventilateurs, que nous avons décrits n° 15. Ils ne poussent pas l'air directement sur le foyer,

mais par l'effet du vide que produit leur rotation, ils *appellent* dans leur intérieur un air continuellement nouveau, qui ne peut leur arriver qu'après avoir traversé le foyer; ce qui produit le même effet qu'un soufflet énergique.

Trompes. Enfin, dans certaines localités, on met à profit les courants d'eau qui descendent des montagnes pour produire un mouvement d'air assez rapide. Cette eau enfile un tuyau vertical de 6 à 8 mètres, et en tombant, elle entraîne avec elle l'air qui pénètre par des ouvertures latérales *a*, *b*. Cet air se trouve condensé dans la caisse B, et s'échappe par le tuyau T; la colonne d'eau en tombant sur la planche F, dégage l'air qu'elle contient. Ce système de soufflage a reçu le nom de *trompe*.

156. Nous terminerons ce chapitre par la description de deux petits appareils qui ne sont que de simples jeux de physique.

Ludions. On appelle *ludions* ou *ondins*, de petites figures d'émail suspendues dans l'eau que contient un bocal, et portant sur la tête une boule de verre creuse, dont la légèreté spécifique les empêche d'enfoncer. Le bocal est fermé à sa partie supérieure par un parchemin bien ficelé tout autour. Lorsqu'on presse sur le parchemin avec le doigt, la petite figure descend, comme si on la poussait; elle remonte au contraire, quand le doigt se retire.

L'explication de ce phénomène est fort simple.

Lorsqu'on appuie sur le parchemin avec le doigt, on diminue un peu le volume d'air inférieur, et par conséquent, on le condense. L'eau n'étant pas compressible, la pression exercée sur l'air se transmet par le liquide à l'air contenu dans la boule, et le comprime autant qu'il a été comprimé lui-même. Il en résulte une réduction de volume, et par suite l'introduction d'une goutte d'eau qui alourdit le système et le fait descendre. Lorsque le doigt se retire, l'air supérieur reprend son volume, et ainsi fait l'air de la boule qui cesse d'être comprimé. En se débandant, celui-ci repousse à l'extérieur la goutte d'eau introduite, et l'appareil est ramené à son poids primitif; il devra donc remonter pour reprendre sa position initiale. Chaque application du doigt sur le parchemin produira le même effet, et l'on pourra faire ainsi danser la petite figure, sans presque paraître y toucher. Le poids de la figure et de la boule sont établis de telle manière, que le système est en équilibre quand le sommet de la boule déborde infiniment peu le niveau.

157. La *fontaine de circulation* qu'on voit exposée devant les boutiques des marchands de baromètres ou de *bric-à-brac*, est un appareil dans lequel circule, pendant des heures entières, une liqueur colorée entre-mêlée de nombreuses bulles; il se compose d'un tube principal droit *ab*, et d'un autre tube plus fin, mais contourné de mille manières, qui se rattache

Fontaine de circulation.

au premier par ses deux extrémités. On verse d'abord par l'orifice *b*, une certaine quantité de liquide, de telle sorte qu'après le retournement, la boule *n* en soit à moitié remplie. La pression de la colonne *nb* fait sortir le liquide par la pointe *a*. Une goutte tombe dans la boule D qui contient cette pointe, en même temps que l'orifice du tube contourné. La goutte en tombant dans cette boule y condense l'air; et la tension qui en résulte a pour effet d'empêcher la goutte suivante de tomber à son tour, et la pousse dans le tube contourné, où elle est suivie par une bulle d'air, dont le départ remet l'air de la boule dans son état de tension primitif. Il pourra donc entrer une nouvelle goutte dans cette boule, et par suite une goutte aussi dans le tube avec une bulle d'air après elle. Le tube contourné pourra donc recevoir du liquide, qui, avec les bulles d'air, le remplira tout entier; et cette colonne courbe peut s'élever plus haut que le niveau en *n*, parce que, mêlée de bulles d'air, elle est spécifiquement plus légère. D'ailleurs, comme on sait, sa pression ne dépend pas de sa longueur ou de son développement absolu, mais de sa hauteur verticale seulement. Il en résulte que le liquide pourra rentrer dans la boule *n*; de sorte que la circulation pourra être entretenue plus longtemps. Mais il est clair que tout le liquide du réservoir *nb* finira par entrer dans la boule D, et alors l'opération s'arrêtera. Pour remettre l'instrument en activité, il faudra le retourner

métallique. Mais entre autres objections, il faut remarquer qu'une pareille sphère, en y supposant le vide fait, ou l'air très-raréfié, serait, à cause de la minceur de ses parois, écrasée par la pression extérieure. Cette difficulté affecte sans exception toutes les substances solides et résistantes dans lesquelles on voudrait faire le vide ou raréfier l'air; aussi pensa-t-on d'abord qu'il n'y avait que des enveloppes flexibles qui pussent résoudre le problème.

159. Il fut résolu en 1783 par Montgolfier, fabriquant de papier à Annonay. Ce célèbre industriel construisit une espèce de sac sphérique en toile, qui fut recouvert de papier; au bas se trouvait une ouverture sous laquelle on brûlait de la paille, de manière à introduire dans le sac de l'air chaud, et à le gonfler complétement. L'air chaud étant à volume égal plus léger que l'air froid, on conçoit que l'enveloppe, plus l'air chaud qu'elle renfermait, fissent ensemble un poids moindre que celui de pareil volume d'air froid ambiant. Aussi le ballon s'éleva-t-il dans l'air à une grande hauteur. Il faut remarquer que la chaleur de l'air enfermé se trouvait entretenue par des substances en combustion que l'aérostat emportait avec lui; aussi n'est-ce qu'après l'extinction du feu que le ballon commença à descendre. Cette célèbre expérience eût lieu le 15 juin 1783. Montgolfière.

L'appareil en papier et à air chaud reçut le nom de *Montgolfière*. Il était nécessairement de très-grande dimension, si l'on voulait qu'il pût enle-

CHAPITRE XIII.

DE L'AÉROSTATION.

Aérostats en général.

158. Les corps solides, d'une densité moindre que celle de l'eau, surnagent à ce liquide, et ceux d'une densité moindre que celle de l'air, s'élèvent dans ce gaz. Mais on fait aussi surnager à l'eau des corps d'une densité plus grande que la sienne, en les évidant, et les remplissant avec des substances d'une densité moindre; on doit en induire qu'il sera possible de faire flotter dans l'air des substances plus denses que ce gaz, au moyen d'une compensation analogue. Il s'agit seulement d'obtenir un corps qui, tout pesant qu'il soit, pèse moins qu'un volume d'air égal au sien, ou dont 100 mètres cubes ne dépassent pas 129 kilogrammes.

L'idée de faire flotter dans l'atmosphère des corps pesants, et des appareils qui pussent même emporter l'homme à travers les airs, cette idée, disons-nous, n'est pas neuve, quoiqu'elle n'ait été mise à exécution qu'à une époque relativement très-récente. Au XVIIe siècle, un jésuite, le P. Lana-Terzi, avait proposé de faire le vide dans une immense sphère creuse en cuivre, à minces parois, et il est clair qu'en théorie on peut rendre ainsi plus léger que pareil volume d'air un globe

métallique. Mais entre autres objections, il faut remarquer qu'une pareille sphère, en y supposant le vide fait, ou l'air très-raréfié, serait, à cause de la minceur de ses parois, écrasée par la pression extérieure. Cette difficulté affecte sans exception toutes les substances solides et résistantes dans lesquelles on voudrait faire le vide ou raréfier l'air; aussi pensa-t-on d'abord qu'il n'y avait que des enveloppes flexibles qui pussent résoudre le problème.

159. Il fut résolu en 1783 par Montgolfier, fabriquant de papier à Annonay. Ce célèbre industriel construisit une espèce de sac sphérique en toile, qui fut recouvert de papier; au bas se trouvait une ouverture sous laquelle on brûlait de la paille, de manière à introduire dans le sac de l'air chaud, et à le gonfler complétement. L'air chaud étant à volume égal plus léger que l'air froid, on conçoit que l'enveloppe, plus l'air chaud qu'elle renfermait, fissent ensemble un poids moindre que celui de pareil volume d'air froid ambiant. Aussi le ballon s'éleva-t-il dans l'air à une grande hauteur. Il faut remarquer que la chaleur de l'air enfermé se trouvait entretenue par des substances en combustion que l'aérostat emportait avec lui; aussi n'est-ce qu'après l'extinction du feu que le ballon commença à descendre. Cette célèbre expérience eût lieu le 15 juin 1783. Montgolfière.

L'appareil en papier et à air chaud reçut le nom de *Montgolfière*. Il était nécessairement de très-grande dimension, si l'on voulait qu'il pût enle-

ver un poids considérable, attendu la différence de densité assez faible entre l'air chaud et l'air froid. Le premier ballon de Montgolfier avait plus de 11 mètres de diamètre, et une capacité de plus de 750 mètres cubes. Un pareil volume d'air à 15° et à la surface de la terre, pèse 920 kil., et le volume correspondant d'air à 100° en pèse encore 712; ce ballon avec de l'air à 100° n'aurait donc pu enlever que 200 kilogrammes environ, en y comprenant son propre poids; mais l'air était plus chaud encore à l'intérieur, puisque le ballon pesait 500 kilogrammes. On peut juger par là de la grandeur des dimensions de la montgolfière au moyen de laquelle, le 21 novembre de la même année, *Pilâtre des Rosiers* et le marquis d'*Arlandes* s'élevèrent à un kilomètre de hauteur, et parcoururent au-dessus de Paris, en 17 minutes, une distance de deux lieues.

160. On ne tarda pas à remplacer l'air chaud par une autre substance incomparablement plus légère, et d'un emploi beaucoup plus facile. Ce fut encore un ingénieux physicien français, nommé Charles, qui en eut la première idée, et le premier aussi la mit à exécution. Le gaz hydrogène est un fluide 14 fois plus léger que l'air à la même température; il est donc propre à enlever des poids beaucoup plus considérables à volume égal, ou un même poids sous un volume beaucoup moindre que les ballons à air chaud. De plus, il est très-pénible et très-dangereux à la fois d'entretenir du feu dans les montgolfières; c'est

une opération supprimée dans les ballons à gaz. Mais l'hydrogène doit être renfermé dans une enveloppe imperméable. Cette enveloppe est du taffetas verni au moyen de la dissolution de caoutchouc dans l'huile de térébenthine. Elle conserve le gaz assez longtemps, mais il ne faut pas croire que l'imperméabilité en soit absolue. On fait de petits ballons en baudruche qui sont encore plus perméables, et qui donnent lieu néanmoins à quelques agréables expériences. Il nous souvient d'avoir lancé un aérostat de cette espèce, d'un mètre environ de diamètre, qui parcourut en vingt minutes un espace de 18 lieues. On fait de très-petits ballons avec de minces vessies de caoutchouc; et de plus petits encore avec la soie liquide et desséchée du bombyx. Les bulles de savon sont des aérostats qui voltigent quelque temps dans l'air. En s'emplissant la bouche de gaz hydrogène, on en fait de vrais ballons qui s'élèvent dans l'atmosphère, et y flottent assez longtemps.

Ballons à gaz hydrogène.

Ce fut le physicien Charles qui, en compagnie d'un autre savant du nom de Robert, s'éleva le premier en ballon à gaz hydrogène; son appareil n'avait que $8^{m},50$ de diamètre. En 1785, Blanchard et Jefferies traversèrent la Manche entre Douvres et Calais. La même année, Pilâtre des Rosiers, ayant eu l'idée folle d'associer une montgolfière avec un ballon, laissa le feu prendre à son appareil, et se tua en tombant avec lui. Un accident analogue coûta la vie, en 1819, à la célèbre aéronaute, madame Blanchard. Elle mit le feu à

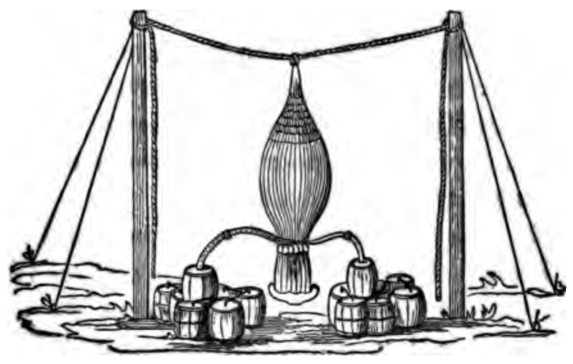
son ballon avec des pièces d'artifice qu'elle lançait, et vint en tombant se briser sur un toit.

La navigation aérienne a trouvé de nombreux argonautes. Tout le monde a entendu parler des voyages atmosphériques de M. Green, qui parti du Wauxhall de Londres, traversa la Manche avec ses deux compagnons, et vint aborder dans un village du royaume de Wurtemberg. Aucune expédition toutefois n'a atteint la célébrité de la fameuse ascension de M. Gay-Lussac, qui eut lieu à Paris le 15 septembre 1804. M. Gay-Lussac parvint à une hauteur de 6,980 mètres, ou une lieue trois quarts; et après six heures de promenade aérienne, alla descendre près de Rouen. Nous dirons plus loin les résultats obtenus dans cette pérégrination hardie. Occupons-nous actuellement de ce qui concerne le gonflement et la manœuvre des aérostats.

Emplissage de l'aérostat.

161. Étant donnée l'enveloppe dont les dimensions doivent être réglées sur la charge qu'on veut imposer au ballon, on y applique le filet qui doit l'envelopper avec la nacelle et tous les poids qu'elle doit enlever; l'aéronaute est remplacé provisoirement par un poids un peu plus lourd que le sien. Cette enveloppe étant suspendue avec des cordes à une hauteur convenable, on engage au-dessous d'elle, par l'intermédiaire d'un baquet analogue à la planche de la cuve hydropneumatique, les tubes qui partent des tonneaux où se prépare le gaz. On a reconnu qu'en général la production d'un mètre cube d'hydrogène exigeait

3o litres d'eau, 3 kilog. de fer et 5 kilog. d'acide sulfurique du commerce; on pourra donc calculer d'avance, d'après le volume convenu du ballon, quelle quantité de ces divers ingrédients il faudra employer; mais en général on en mêle une quantité double, à cause des pertes et du volume considérable de gaz qui reste dans les tonneaux. Le gaz hydrogène formé dans les divers tonneaux et parvenu sous les cuves de dégagement, s'y lave et s'y refroidit avant de passer dans l'enveloppe:



cette dernière précaution est très-importante; car outre l'action fâcheuse que le gaz chaud exercerait sur le vernis du taffetas, son refroidissement ultérieur dans l'enveloppe, et la contraction qui en résulte, auraient pour effet de dégonfler plus tard le ballon. Le gaz sortant de ce bain, entre dans l'enveloppe qu'on avait d'abord comprimée pour en chasser tout l'air, et à mesure que l'hydrogène s'y loge, elle se distend et prend du corps. Comme dans tous les cas où l'on veut avoir des gaz purs, on laisse perdre les premiers litres d'hydrogène,

avant d'engager sous l'enveloppe les tuyaux flexibles qui y portent le gaz. Insensiblement l'enveloppe se gonfle, et lorsqu'on a obtenu le degré d'expansion convenable, on ferme l'ouverture inférieure, et l'aéronaute entre dans la nacelle; puis on ôte les poids qui le remplaçaient provisoirement, plus 4 à 5 kilogrammes, dont la suppression produit ce qu'on appelle la force ascensionnelle de l'aérostat. Cela fait, on coupe les cordes qui le retenaient captif, et le ballon s'élance dans les airs. L'ascension se fait avec un mouvement accéléré, car, ainsi que nous allons le faire voir, la force ascensionnelle reste constante; son action s'ajoutant donc sans cesse à la vitesse acquise, il en résulte pour le mouvement ascendant une accélération évidente.

Densité constante.

162. Aussitôt que le ballon commence à s'élever, il se gonfle nécessairement plus qu'il ne l'était d'abord; car il entre immédiatement dans des couches d'air de densité décroissante : donc il est moins pressé par l'air ambiant; par conséquent le gaz intérieur doit se dilater, suivant la loi de Mariotte. Il en résulte d'abord l'inévitable nécessité de ne gonfler les ballons à terre que partiellement, et en fait on ne les gonfle jamais qu'à moitié. S'ils étaient au moment de leur départ entièrement distendus par le gaz, la dilatation à laquelle celui-ci est sujet dès ces premiers moments de liberté, aurait pour effet de distendre davantage l'enveloppe déjà pleine, et n'irait à rien moins qu'à la faire crever.

De plus, bien loin d'y gagner quelque chose du côté de la légèreté spécifique, on alourdirait le ballon d'un poids égal à la moitié du gaz qu'il renferme. En effet, le ballon étant à moitié plein au moment de son départ, le gaz se dilate librement à mesure qu'il s'élève, et la densité relative de la masse reste néanmoins la même. Car quand le gaz occupe un volume double, par exemple, il perd de son poids absolu qui ne change pas, une partie égale au poids d'un volume d'air double; mais s'il est dilaté de manière à occuper un volume égal à 2, c'est que l'air ambiant a une densité moitié moindre; donc sans le volume 2, cet air pèse autant, de sorte qu'en définitive la perte de poids reste la même. On voit donc d'abord que rien ne changeant dans la densité relative du ballon, du moins en négligeant la très-petite différence qui en résulte pour la nacelle et tout son bagage qui perdent un peu moins de leur poids dans l'air moins dense, la force ascensionnelle qui entraîne le ballon reste constante. Et puisqu'il en est ainsi, il est clair que le ballon monte tout comme s'il était plein; d'où il résulte qu'en le remplissant entièrement, on l'aurait surchargé du poids d'une portion de gaz inutile.

L'aérostat continuant donc de s'élever, et de se tendre par l'effet de la dilatation du gaz, il viendra un moment où il se trouvera gonflé tout à fait. Sa force ascensionnelle le portera encore au delà de la région à laquelle il sera parvenu; mais dès ce moment l'enveloppe sera inutilement pressée

par la dilatation croissante du gaz. Si elle est suffisamment résistante pour qu'il n'en résulte pas de déchirure, elle maintiendra au gaz la densité qu'il avait au moment que nous considérons; tandis que l'air va toujours en diminuant de densité. Le ballon n'est donc plus sollicité à monter; toutefois il dépasse encore ce point en vertu de la vitesse acquise; celle-ci ne tarde pas à être usée par la résistance de l'air et l'augmentation de poids relatif que prend encore l'aérostat par cette ascension continuée; alors l'appareil s'arrête; puis il retombe pour rentrer dans la couche atmosphérique de densité égale à la sienne : mais il la dépasse d'abord en descendant, comme le pendule revenu dans la verticale, et il ne s'y fixe qu'après un certain nombre d'oscillations.

163. Si l'on remplissait entièrement le ballon à terre, la force ascensionnelle serait plus grande; puisque en faisant abstraction du poids des appareils, qui reste le même dans tous les cas, cette force est la différence entre des volumes égaux de gaz et d'air, et que, pour des volumes doubles, la différence est évidemment double. Dans ce cas, on monterait évidemment plus vite, ce qui n'est pas un avantage; car il vaut mieux traverser l'air avec une vitesse modérée. Mais on monterait d'ailleurs moins haut, puisque le ballon chargé d'un excès de gaz inutile serait une masse plus lourde qui rencontrerait beaucoup plus tôt une couche de densité égale à la sienne. On voit donc encore une fois qu'en remplissant totalement le ballon à

terre, on rassemblerait des inconvénients de tout genre; d'ailleurs, il y aurait encore le danger de déchirure que nous avons déjà signalé. Ce danger serait d'autant plus sérieux, que, dans le cas qui nous occupe, la force ascensionnelle étant plus considérable, on s'élèverait d'abord assez haut au-dessus de la couche d'air d'une densité égale à celle du ballon gonflé; la réaction du gaz intérieur serait donc très-grande sur l'enveloppe. Du reste, et dans tous les cas, le changement de température qu'on rencontre en changeant d'altitude est sans influence sur la dilatation, parce que l'effet en est égal sur le gaz et sur l'air atmosphérique ambiant.

Usage des soupapes.

164. A la partie supérieure du ballon se trouvent une ou deux soupapes fermées par des ressorts, et que l'aéronaute peut faire jouer à volonté au moyen de cordes. Pour s'élever le plus haut possible, il ouvre une de ces soupapes lorsque le ballon est fortement distendu. L'appareil perd alors une portion de gaz, sans qu'il rentre de l'air, vu l'excès de tension du gaz, et il en peut perdre jusqu'au point où le ballon, par l'effet de cette perte, commencerait à n'être plus entièrement gonflé. Ce point précis n'est pas facile à saisir; mais il est possible d'émettre ainsi, sans dépasser la limite, une certaine portion de gaz; et il est aisé de reconnaître que l'effet de cette fuite est de faire monter le ballon; car l'appareil se trouve déchargé d'un poids égal, et comme d'ailleurs, par hypothèse, son volume n'est pas dimi-

nué, la perte de son poids dans l'air ambiant reste ce qu'elle était; donc, enfin, le ballon perd en poids total le poids du gaz éliminé. Le moyen de monter aussi haut que possible est donc fourni par le jeu de la soupape, quand l'aérostat est parvenu dans sa couche d'équilibre. Il semble qu'on pourrait gagner encore quelque chose dans ce genre, en jetant le lest dont la nacelle est pourvue; le ballon serait évidemment allégé; mais c'est un moyen auquel on ne doit pas recourir: car le lest a une destination importante, qui serait très-malheureusement compromise par l'emploi dont il est ici question; et, de plus, si l'on devait s'en servir pour s'élever davantage en le perdant, il reviendrait au même, et il serait beaucoup plus simple de n'en pas emporter.

Comment s'opère la descente.

165. Comme l'aéronaute n'a autour de lui aucun objet fixe auquel il puisse rapporter son mouvement, pour savoir s'il descend ou s'il monte, il consulte le baromètre. Lorsque celui-ci s'abaisse, le voyageur s'élève; et, au contraire, le ballon descend quand la colonne barométrique monte. Il peut donc se régler sur le mouvement de cette colonne pour diriger l'emploi des moyens qu'il possède en vue de monter ou de descendre.

Lorsqu'il voudra opérer sa descente, il devra ouvrir une des soupapes et perdre du gaz jusqu'à ce que le ballon commence à se dégonfler. L'appareil deviendra relativement plus lourd; car si l'on perd, par exemple, un mètre cube de gaz hydrogène, qui pèse environ 90 grammes, la perte

de poids de l'appareil dans l'air sera diminuée du poids d'un mètre cube d'air, ou 1,800 grammes environ; c'est donc comme si le ballon pesait 1,210 grammes de plus. Or, dans ce cas, le ballon qui passe de l'état d'équilibre à une surcharge de plus de 1,200 grammes, est donc pressé par une force verticale de haut en bas, ou par une impulsion descendante; donc il descendra, en effet, et d'un mouvement accéléré, comme se fait toute chute; mais bientôt la vitesse, par l'effet de la résistance de l'air, deviendra constante. L'augmentation de densité des couches d'air inférieures ne modifie pas le poids relatif de l'aérostat, la compensation se faisant, comme ci-dessus, entre le gaz et l'air ambiant. L'augmentation de densité a pour effet de diminuer un peu la vitesse après qu'elle a cessé d'être accélérée; si la densité fût demeurée la même, la vitesse aurait fini par devenir constante.

Lorsque l'aéronaute, après avoir commencé sa descente, s'aperçoit que le lieu sous-jacent n'est pas favorable à cette opération, il jette hors de la nacelle une partie du lest dont il s'est muni. Ce lest est ordinairement du sable. Redevenu plus léger, il arrête ainsi son mouvement de descente, qui peut même se convertir en mouvement d'ascension, et il livre son aérostat à l'action des courants d'air, qui règnent toujours dans ces hautes régions, et qui le transportent dans un lieu qu'il jugera plus propre à la descente. Toutefois, il peut se tromper dans l'appréciation de la localité, qu'il

ne voit que de loin, et se trouver contraint de remonter encore pour se transporter ailleurs, d'où résulte la nécessité de ménager le lest. Très-souvent c'est près de la surface de la terre que l'aéronaute fait choix du lieu où il doit descendre; en disposant de son lest avec mesure, il peut se poser doucement au point qu'il a choisi. Si, par une cause quelconque, telle qu'une fuite de gaz à son ballon, il se trouve obligé de descendre sans pouvoir disposer du lieu de sa chute, il pourra arriver qu'il rencontre une nappe d'eau quelconque; alors la nacelle lui servira de support; mais il devra couper les cordes qui la rattachent au ballon, sur lequel le vent aurait trop de prise pour ne pas exposer la nacelle à chavirer.

Mesure de la hauteur à laquelle on parvient.

166. La hauteur à laquelle on parvient se détermine par l'inspection du baromètre; c'est un problème de la nature de celui que nous avons posé n° 110, et il se résout au moyen de la formule logarithmique dont nous avons fait usage. Dans la célèbre ascension de M. Gay-Lussac, le baromètre descendit à $0^m,329$, et au départ il marquait $0^m,7652$; les températures inférieure et supérieure étaient respectivement $30^\circ,75$ et $9^\circ,5$. Mettant ces données dans la formule, on obtient pour z la valeur 6980 mètres.

167. On peut même calculer d'avance avec une certaine approximation, la hauteur à laquelle pourra s'élever un ballon, en prenant pour cette hauteur celle où le ballon se trouve plein, ou entièrement gonflé sans excès de tension. De plus,

il faut négliger la petite force ascensionnelle, et, enfin, prendre assez arbitrairement la moyenne des températures $\frac{t+t'}{2}$. Supposons qu'au départ le ballon soit gonflé seulement à moitié. Lorsqu'il arrivera dans la région d'équilibre, son volume $\frac{1}{2}$ sera devenu 1, ou doublé; donc la densité de l'air ambiant sera devenue $\frac{1}{2}$. La valeur numérique du rapport $\frac{h}{H}$, dans la formule, est donc dans le cas actuel égale à 2. D'où :

$$z = 18393\left(1 + \frac{2(t+t')}{1000}\right) \log 2.$$

On connaît t, on se donnera t' d'après des vues conjecturales; mais l'erreur sur ce point a peu d'influence; car, en général, t' est petit, et l'erreur est divisée par 1000. Soit $t = 25°$, et $t' = -4°$; d'où $z = 18393\left(1 + \frac{42}{1000}\right) \log 2 = 18393 . 1{,}042 . 0{,}30103 = 5769$ mètres. Si, au lieu de $t' = -4$, nous posions $t' = 0°$, et $t = -10°$, les résultats respectifs seraient $z = 5815$ et $z = 5699$; résultats peu différents de celui obtenu d'abord.

168. L'ascension exécutée par M. Gay-Lussac l'avait été dans un but scientifique. Le célèbre physicien, muni d'un ballon vide, alla puiser de l'air dans les hautes régions; et il reconnut, par une analyse postérieure, que la composition en était la même qu'à la surface de la terre. Il reconnut aussi que les oscillations de l'aiguille aimantée diminuaient rapidement d'amplitude; ce qui indique un décroissement de la puissance magnétique terrestre avec la distance. Il vit au-dessus de lui des nuages qui lui paraissaient aussi élevés

que ceux qu'on regarde de la terre; ce qui indique dans nos appréciations à cet égard une erreur plus grande qu'on ne l'aurait cru. La sécheresse est extrême dans ces hautes couches d'air; des parchemins, mouillés quelques minutes auparavant, s'y desséchaient et se crispaient comme devant le feu. De la combinaison de cette sécheresse avec la trop faible densité de l'air résulte un trouble notable dans les fonctions physiologiques. L'air fournissant moins d'oxygène dans un temps donné, la respiration doit s'accélérer à proportion, et la circulation sanguine doit par conséquent aussi devenir plus rapide; aussi les pùlsations, qui en sont l'indice et la mesure, se sont-elles élevées, pour M. Gay-Lussac, de 66 à 120 par minute. Une fièvre véritable, des vertiges, un bourdonnement d'oreilles, tels sont les phénomènes qui saisissent l'aéronaute. En même temps que la respiration devient difficile, la combustion se montre telle aussi; il est presque impossible d'y entretenir du feu. Du reste, il règne dans ces hautes régions un solennel silence; aucun des bruits de la terre n'y parvient; et le sentiment d'une solitude infinie frappe et émeut profondément l'âme du voyageur. L'aérostat est toujours soumis à quelque courant; mais le vent est insensible, parce qu'on a la même vitesse que lui et qu'il n'éprouve aucune résistance. En cédant à son action, l'appareil tourne sur lui-même avec lenteur, comme on en peut juger par l'aspect du ciel.

169. On peut calculer assez simplement quel diamètre il faut donner à un ballon pour le mettre en état d'enlever un poids donné. Calcul du diamètre d'un ballon.

Soit P le poids à enlever, qui se composera de celui de la nacelle, des agrès, du lest et des aéronautes; x le diamètre de l'aérostat; πx^2 sa surface, qui, à raison de $0^k,25$ par mètre carré, pèse $\frac{1}{4}\pi x^2$ kilogrammes. Le volume du ballon plein sera $\frac{\pi}{6}x^3$, à raison de $0^k,089$ par mètre cube d'hydrogène, le poids sera $0,089\frac{\pi}{6}x^3$, ou comme il n'est gonflé qu'à moitié, $0,089\frac{\pi}{12}x^3$. On trouvera de même pour le poids du volume d'air déplacé par le ballon $1,3.\frac{\pi}{12}x^3$. Soit aussi 5 kil. la force ascensionnelle voulue, qui vient en déduction du poids de l'aérostat, on aura :

$$0,089\frac{\pi}{12}x^3+\frac{\pi}{4}x^2+P+5=1,3\frac{\pi}{12}x^3,$$

$$\text{ou } x^3-2,4793x^2-3,41986(P+5)=0.$$

Équation du 3e degré qu'il s'agira de résoudre en donnant à P la valeur dont cette somme se compose dans la circonstance.

Soit, par exemple, P = 150 kil. pour le poids de *deux* voyageurs; 45 kil. pour la nacelle et les agrès, 40 kil. pour le lest : on a ... $x^3-2,4793x^2-757,\ldots=0$.

Cette équation a une racine positive $x=10,05$. Ainsi le ballon devrait avoir un peu plus de dix mètres de diamètre.

170. Au lieu d'employer pour les grandes ascensions un aérostat unique, il serait peut-être avantageux, sous beaucoup de rapports, d'employer un certain nombre de ballons d'un plus petit Ballons conjugués.

diamètre, et liés entre eux d'une manière solide. On pourrait ainsi préparer d'avance et fabriquer en grand des ballons d'un volume donné et fixe dont la puissance serait rigoureusement connue, et qui seraient des *ballons-unité;* on en joindrait dans chaque circonstance le nombre nécessaire pour le but qu'on se propose, et rien ne serait aussi facile que de déterminer ce nombre dans chaque cas donné. Que le ballon-unité ait par exemple, 5 mètres de diamètre : son volume sera 65 mètres cubes; sa surface de 80 mètres carrés qui pèseront 20 kil. Le poids de 65 m. c. d'hydrogène à 80 grammes sera 5,224, et à demi-gonflement 2^k,612... tandis que pareil volume d'air pesera 42^k,5. On reconnaît ainsi que chaque ballon ferait équilibre à 21 kil.; de sorte qu'on réunirait autant de ballons que le poids à enlever contiendrait de fois le nombre 21. Des ballons de 10 mètres pourraient enlever chacun près de 200 kilogrammes. Cette combinaison d'aérostats est d'un système fort simple, et il est manifeste que c'est le seul auquel il serait possible de recourir pour enlever des milliers de kilogrammes ou des cargaisons entières de voyageurs. Les diligences aériennes seraient traînées par 5, 8, 12... ballons comme les voitures ordinaires le sont par 4, 5, 6 chevaux.

Direction des aérostats.

171. Ceci nous amène à parler des tentatives qui ont été faites pour diriger les aérostats. Toutes ces tentatives, dont la plupart consistaient dans l'emploi d'ailes de divers genres qu'il s'agissait de faire

manœuvrer, ont échoué jusqu'ici, et ne laissent guère l'espérance de trouver quelque chose de mieux. Les hautes régions sont incessamment balayées par des courants contraires, dont les caprices mettront toujours obstacle à la manœuvre, de quelque nature qu'elle soit. Ce qu'il y a de mieux à faire, est de chercher un moyen facile de monter et de descendre pour profiter dans chaque couche du courant qui y règne, selon la direction qu'on veut suivre. Mais il est au moins douteux qu'on puisse jamais faire de l'aérostat un véhicule qui soit véritablement utile (1).

Nous avons dit, au commencement de ce chapitre, qu'on avait renoncé aux ballons de cuivre, à cause de l'impossibilité d'y faire convenablement le vide. Au moment où nous écrivons ceci, on établit à Paris un aérostat en feuilles de cuivre très-minces, qui sera rempli de gaz hydrogène. Mais l'ascension n'ayant pas encore eu lieu, le succès de cette expérience reste, quant à présent, à l'état de problème.

CHAPITRE XIV.

AÉRODYNAMIQUE. — MOUVEMENTS DE L'AIR ET DES CORPS DANS L'AIR.

172. Les corps, en traversant le milieu atmosphérique, déplacent les colonnes d'air qu'ils rencontrent; or, l'effet de tout choc est de communiquer au corps choqué une partie du mouvement du corps choquant, qui, par suite, s'en trouve dépouillé. De là les effets de la résistance de l'air sur le mouvement des corps.

Si ceux-ci offrent une large surface, ils ont à déplacer une colonne d'air très-considérable; et si, sous cette surface très-grande, ils ont une masse très-faible, il en résultera une atténuation de vitesse qui peut presque anéantir celle-ci.

Parachute. Les *parachutes* qui accompagnent quelquefois les ballons sont une application remarquable de la résistance de l'air. Ce sont d'immenses parapluies qui portent une corbeille dans laquelle se place l'aéronaute lorsqu'il abandonne son ballon. Cette vaste toile éprouve de la part de l'air qu'elle frappe à plat une telle résistance que, malgré le poids qu'il porte, le parachute descend avec une lenteur extrême. La corbeille vient pour ainsi dire se poser à terre. Au milieu de cette vaste surface se trouve une cheminée qui a pour effet de

donner passage à l'air engouffré sous cette tente aérienne, et de prévenir les oscillations. On descend avec un parachute d'une hauteur de plusieurs centaines de mètres.

173. On a proposé d'utiliser la résistance de l'air pour arrêter les trains des rails-ways lorsqu'un accident quelconque empêche les moyens ordinaires d'arrêt de fonctionner convenablement. Le moyen consiste à faire basculer tout à coup de grandes plaques de tôle, qui ordinairement assises à plat dans les voitures, se dresseraient, en cas d'arrêt, dans une position verticale. La grandeur de ces surfaces, jointe à la rapidité du mouvement, produirait une résistance atmosphérique très-considérable qui ne tarderait pas à arrêter le train.

174. Le rôle que remplit dans les grandes machines le volant à roue, est dévolu dans d'autres à un volant à palettes. Dans les horloges, par exemple, c'est un volant de cette nature qui régularise les mouvements de la roue qui fait sonner les heures.

175. C'est la résistance de l'air qui divise les jets d'eau, et les éparpille; c'est elle qui affaiblit le choc des masses qui tombent de haut, telles que la grêle et même la pluie. Une masse d'eau jetée d'une fenêtre élevée n'arrive guère au sol qu'à l'état de gouttes. On peut se faire une idée de ce que serait dans le vide le choc d'une colonne d'eau d'un diamètre et d'un poids fort peu considérables, au moyen du petit appareil connu

Marteau d'eau.

sous le nom de *marteau d'eau*. C'est un gros tube de verre fermé par les deux extrémités et renflé en boule; la partie cylindrique est en grande partie remplie d'eau; le reste de l'espace est vide d'air. Lorsqu'on secoue verticalement le tube, la colonne d'eau s'élève et retombe sur le fond sans se diviser; le choc qu'elle produit alors est comparable à un coup de marteau, et l'on s'étonne en l'entendant qu'il ne produise pas la rupture du tube. La vibration du renflement concourt à rendre le son plus intense. Pour faire le vide dans l'espace que n'occupe pas l'eau, on fait bouillir celle-ci, et lorsque sa vapeur occupe complétement cet espace d'où elle a chassé l'air, on ferme brusquement à la lampe la pointe qui surmonte la boule. Par l'effet du refroidissement, cette vapeur repasse à l'état liquide, et l'espace est vidé d'air.

176. Les mouvements de l'air sont déterminés en général par l'inégalité des températures de ses différentes parties. L'air échauffé se dilate, de sorte qu'une même masse occupe un volume plus considérable; donc sa densité diminue. Or l'air froid et l'air chaud inégalement denses sont dans le cas du mélange de l'huile et de l'eau; le plus léger s'élève et se fixe dans la région supérieure. Or, mille causes, et l'influence solaire surtout, troublent continuellement les températures, et déterminent dans la masse atmosphérique de continuels mouvements. Telle est l'origine générale des vents; mais les courants divers se combinent

entre eux de mille façons, de manière à effacer complétement la trace des directions primitives.

Tout le monde connaît ces appareils vulgaires désignés sous le nom de *girouettes*, et qui sont l'emblème de la mobilité. Une girouette, en général, est une lame métallique verticale mobile autour d'un axe. Si l'appareil présentait aux vents des deux côtés de l'axe de rotation des surfaces égales, la plaque sollicitée par deux impulsions égales du vent sur ces deux portions équivalentes, resterait immobile, comme les deux plateaux d'une balance qui sont également chargés. Mais étant donnée l'inégalité des surfaces, le vent agira sur la plus large avec une puissance représentée par les différences des deux portions qui lui font face; il en résultera donc une rotation qui ne pourra s'arrêter que lorsque la plaque mobile aura son plan dans la direction du vent. Il est manifeste qu'alors il n'aura pas de prise sur elle. La girouette dépasse d'abord cette position en vertu de la vitesse acquise; mais il est facile de reconnaître que si, poussée par le vent *bm*, elle dépasse la position d'équilibre *a*X, pour se placer en *an*, le vent *dn* la repoussera vers cette position, comme il le fait sur *bm*. D'ailleurs, il est aisé de reconnaître que ce sera la plus large portion de la lame qui sera au plus loin du vent. Quand les girouettes sont des flèches, la pointe de ces flèches est tournée du côté d'où vient le vent.

Girouettes.

X n m d a b V

Sur les navires, la direction des girouettes est

indiquée dans la chambre du capitaine, par une aiguille qui en répète les mouvements. Des girouettes placées dans des zones d'altitude peu différentes, donnent en général les mêmes indications; il en est parfois autrement, quand la différence de leurs hauteurs verticales est quelque peu considérable. Cela tient à ce qu'il règne des courants contraires, qu'il est bien facile de reconnaître aux directions diverses que suivent souvent des couches de nuages placées les unes au-dessus des autres. En général, c'est moins la girouette qu'il faut consulter que le mouvement des nuages, car c'est dans les régions supérieures qu'agissent les influences déterminatrices du beau et du mauvais temps.

177. On a imaginé, pour mesurer la vitesse du vent, divers appareils, dont le meilleur paraît être l'*anémomètre de Bouguer*, voici en quoi il consiste.

Anémomètre. Soit un tube de tôle TT′, dans lequel se meut sans frottement un piston, lequel porte des divisions sur la tige; celle-ci est terminée en avant par une large plaque. Si une pression quelconque est exercée sur la plaque, le piston est poussé dans le tube, mais il appuie contre un ressort à boudin qui limite son mouvement, et résiste d'autant plus que le piston enfonce davantage. Il s'agit de graduer la tige du piston, en appliquant à la plaque des forces atmosphériques de vitesses connues, et qui seront la mesure des vitesses du vent quand il produira sur l'appareil des effets égaux.

Pour cela, on établit l'instrument sur un appareil de rotation auquel on peut donner des vitesses à volonté; tels sont, par exemple, ceux des jeux de bagues, qu'on voit partout dans les fêtes publiques. On fait tourner l'anémoscope, la plaque dirigée en avant; cette plaque presse contre l'air avec une force connue; elle éprouve donc le même effet que si l'air venait frapper contre elle avec la même vitesse. On varie ces vitesses à volonté, ce qui fait enfoncer plus ou moins le piston; un anneau mobile à frottement sur la tige indique par sa position jusqu'où le piston s'est enfoncé; on marque en ce point la vitesse correspondante. Supposons, par exemple, que l'appareil rotatif ait 4 mètres de rayon, et fasse 10 tours dans une minute; il aura parcouru dans 6 secondes une circonférence de $25^{m},12$; d'où il résulte que chaque point parcourt $4^{m},2$ par seconde : telle est la vitesse avec laquelle l'air est frappé par la plaque; on marquerait donc $4^{m},2$ sur le point de la tige qui reste à l'entrée du tube. En variant les vitesses, on aurait autant d'indications analogues.

Cela posé, quand l'appareil est exposé au vent, celui-ci agit sur la plaque, et fait enfoncer plus ou moins le piston. On lit le chiffre de la tige qui correspond à cette position, si toutefois elle est fixe, c'est-à-dire si le vent souffle avec une force à peu près constante. Si l'anneau mobile est arrêté au point marqué 17,5, on en conclura que la vitesse du vent est de 17,5 mètres par seconde.

C'est ainsi qu'on a dressé le tableau suivant,

dont les indications en ce qui concerne la qualité des vents n'ont rien de précis, et qu'il ne faut considérer que comme des moyennes :

	VITESSE par seconde en mètres.	PAR HEURE.	
		Mètres.	Lieues.
Vent à peine sensible......	0^{m},5	1,800	0,45
— sensible............	1 ,0	3,600	0,90
— modéré............	2 ,0	7,200	1,80
— assez fort..........	5 ,5	19,800	4,95
— fort................	10 ,0	36,000	9,00
— très-fort...........	20 ,0	72,000	18,00
Tempête simple..........	22 ,5	81,000	20,25
Grande tempête..........	27 ,0	97,200	24,30
Ouragan simple...........	36 ,0	104,400	26,10
— des Antilles renversant les édifices.........	45 ,0	162,000	40,50

Outre la vitesse avec laquelle le vent frappe, l'anémomètre permet de déterminer quelle pression le choc du vent exerce sur une surface connue; il suffit de lui donner une position verticale, ou de charger la plaque de poids connus et croissants qui enfonceront le piston jusqu'à tel ou tel numéro.

Voici les résultats auxquels on est parvenu par ce moyen :

	Vitesse.	Pression sur 1 décim. carré.
Vent à peine sensible.	0^{m},45..........	0^{gr},21
— très-sensible....	0 ,90..........	0 ,86
— frais..........	2 ,23..........	5 ,30
Forte brise..........	8 ,94..........	84 ,97
Rafale.............	15 ,65..........	260 ,30
Tempête...........	20 ,11..........	430 ,70
Ouragan...........	26 ,82..........	765 ,20
— des Antilles..	44 ,71..........	2124 ,70

On voit qu'un ouragan de premier ordre exerce une pression de 212 kil. par mètre carré; ce qui

sur une surface de 8^m de long et 5^m de hauteur, donne 8,480 kil. de pression. On conçoit aisément de quels ravages une pareille force est capable.

On reconnaît sur ce tableau que pour une vitesse double, la pression est quadruple, et qu'elle croît en général comme le carré de la vitesse, ce qui permet de graduer plus facilement l'anémomètre, quand on établit les premières vitesses et les premiers poids correspondants. Supposons par exemple qu'à 1^m de vitesse corresponde un poids de 21 grammes, et soit x celui qui répondrait à 5; on aura $1:25::21:x = 525$ grammes. Plaçant ce poids sur la plaque, l'enfoncement donnerait la vitesse 5 mètres.

En opposant l'anémomètre au choc de l'eau, ce qui se fait en le traînant dans l'eau qui est frappée par la plaque, on trouve qu'il faudrait à l'air une vitesse 24 fois plus considérable qu'à l'eau pour produire une égale impulsion. Au reste, cet instrument est un véritable dynamomètre qu'on peut employer dans une foule de cas pour mesurer des forces d'impulsion.

Nous ferons observer qu'on peut connaître sans anémomètre la vitesse du vent, au moyen d'un duvet qu'on laisse emporter par l'air, comme on connaît la vitesse d'une eau courante au moyen d'un flotteur, tel qu'un morceau de bois qu'on abandonne au courant.

178. La manière de disposer et de conduire les divers appareils de chauffage offre une application très-importante de la mécanique de l'air; elle re-

pose principalement sur les phénomènes qui résultent de la variation des densités.

Foyers d'échauffement. Lorsqu'on allume du feu à l'air libre, l'air qui touche le foyer se dilate par la chaleur et s'élève verticalement; de tous côtés affluent des courants d'air froid qui remplacent la colonne ascendante. Mais ce mouvement des colonnes plus chaudes et plus froides, plus légères et plus lourdes, se prononce bien davantage sous un tube qui circonscrit dans son intérieur la colonne échauffée. Sous une cheminée ou au bas du tuyau d'un poêle, l'air échauffé à travers le feu et rendu plus léger, s'élève rapidement dans le canal qu'il rencontre, et est remplacé par de l'air froid et lourd. La vitesse de la colonne ascendante est ce qu'on appelle le

Tirage. *tirage*. Cette vitesse est déterminée par la différence de poids entre deux colonnes d'air d'égale longueur, l'une chaude et plus légère *co*, contenue dans la cheminée, l'autre froide et plus lourde *ps*, agissant à l'extérieur; les pressions supérieures aux points *o*, *s*, étant égales, on en peut faire abstraction. Supposons que les deux colonnes *co*, *ps* d'égale hauteur, soient en poids dans le rapport de 8 : 11, c'est comme s'il y avait en *c* une colonne 3 tendant à rentrer dans le vide. Si, toutes choses égales d'ailleurs, la cheminée est plus haute avec une colonne d'air également chaude, la différence de poids sera plus considérable. On peut toujours prendre dans la colonne extérieure une hauteur *pm* moindre que *co* et ayant le même poids qu'elle; alors

pm, et *co*, se faisant équilibre, c'est comme si l'on avait une masse d'air *sm* représentée par son centre de gravité x, et tendant à tomber de la hauteur px, selon la loi de Torricelli. C'est avec la vitesse donnée par cette loi que la masse x tend à tomber, ce qui montre d'abord bien l'influence des hauteurs, ou, ce qui revient au même, des longueurs de cheminées. La masse xm tombant, l'air de la cheminée se déverse à l'extérieur par o; mais il y a toujours dans le tuyau une même colonne chaude, équilibrée par une même colonne extérieure froide pm; donc, tout restant d'ailleurs le même, la vitesse d'écoulement par le tuyau, ou le tirage, ne variera pas, et cette vitesse a pour formule théorique $v = \sqrt{2g.Px}$.

On a donc ici la mesure de l'influence de la hauteur dans la construction de la cheminée, et l'on voit pour quel motif on établit de ces appareils dont la hauteur dépasse 30 mètres. Dans ces tuyaux, le tirage est assez énergique pour rendre inutile l'emploi des machines soufflantes. Toutefois, il ne faut pas croire que la vitesse théorique soit celle qu'on obtient réellement. Nous ferons remarquer d'abord que dans un tuyau la température est loin d'être uniforme; néanmoins, la colonne a un certain poids qui est moindre en somme que celui de la colonne extérieure, de sorte qu'on peut toujours prendre une portion pm de celle-ci pour l'équivalent de la colonne contenue dans la cheminée. Mais l'air qui afflue à l'orifice intérieur de celle-ci éprouve dans son ascension des frotte-

ments très-considérables contre les parois du tuyau; de là une diminution de vitesse dont on ne saurait donner la mesure, mais qu'il est aisé de comprendre, et dont on saisit facilement les modifications. Ainsi, à section égale, un tuyau cylindrique offre moins de frottement qu'un tuyau anguleux; elle perd moins aussi dans un tuyau plus large, pourvu qu'il soit également chauffé sur toute sa largeur, car le frottement ne gêne guère que les colonnes contiguës aux parois; celles de l'intérieur, dans le voisinage de l'axe, n'en subissent presque aucun. Dans les cheminées pleines de suie, surtout lorsqu'elles sont étroites, le frottement est très-énergique, et l'on sait combien le tirage s'y fait mal. La vitesse augmente avec l'ampleur et l'activité du foyer, et elle ne paraît pas diminuer par les coudes, si ce n'est en tant que ceux-ci allongent le tuyau sans augmenter sa hauteur verticale.

Appel. 179. Nous avons dit que le tirage, lorsqu'il était énergique comme celui que donnent les hautes cheminées, dispensait de l'emploi de machines soufflantes; et l'on conçoit en effet que l'air passant rapidement à travers le foyer, celui-ci recevra dans un temps donné autant d'oxygène qu'aurait pu lui en fournir un soufflet. Or, de même qu'on peut au moyen des machines soufflantes renouveler l'air qu'on veut purifier, on peut au moyen d'un tirage produire le même effet. C'est une opération très-utile qu'on exécute souvent. Ainsi l'on renouvelle l'air d'une mine, d'un puits, d'une cave, d'une fosse d'aisances où l'on veut pé-

nétrer sans danger, en y faisant déboucher des tuyaux qui s'abouchent dans un fourneau en activité, ou dans l'intérieur desquels on établit une lampe. C'est par ce dernier moyen qu'on maintient un air supportable dans les lieux d'aisances, une petite lampe étant entretenue dans la cheminée de poterie qui surmonte la fosse. Dans les salles de spectacle la chaleur du lustre produit un *appel* énergique. Au-dessus du cintre, on établit une cheminée dans laquelle s'engouffre l'air chaud; cet air est remplacé par de l'air extérieur qui afflue à travers un très-grand nombre de petits trous, disposés de telle sorte que les courants sont insensibles.

Souvent on fait descendre immédiatement sous le parquet, le tuyau des poêles, afin qu'il ne gêne pas la vue, puis il se replie derrière le mur qui sépare deux chambres. Dans ce tuyau en *n* on produit un *appel* soit par l'établissement d'une petite lampe, soit simplement par la flamme de quelques morceaux de papier. Le tirage se trouve ainsi commencé, et la combustion l'entretient.

Les cheminées d'appartement ont le très-grand avantage de renouveler l'air quand on y fait du feu; et même alors qu'on n'en fait pas, il y a toujours entre l'air de la chambre et celui de la cheminée quelque différence de température qui produit un courant. Les poêles n'ont pas complétement le même avantage, parce qu'ils ne reçoivent guère, à cause de la petitesse de leur ouverture,

que l'air indispensable pour activer la combustion. On verra, dans un autre chapitre, sous quels rapports ils l'emportent sur les cheminées.

Causes de la fumée; moyens de s'en préserver.

180. Indépendamment de leur destination à l'égard de la fumée à laquelle elles donnent issue, les cheminées ont donc pour objet le tirage, et seraient encore nécessaires, quand le combustible qu'elles consomment ne donnerait pas de fumée. Mais l'évacuation de la fumée est un service important que les cheminées sont appelées à rendre, et qu'elles ne rendent pas toujours. Le rejet de la fumée dans les chambres est un accident trop commun, dont voici les causes et les préservatifs.

Quoiqu'on voie en général monter la fumée, il ne faut pas croire qu'elle soit par elle-même plus légère que l'air. Lorsqu'elle est froide, elle tombe, et si, en général, elle s'élève dans les tuyaux conducteurs, c'est qu'elle est échauffée et rendue plus légère, outre qu'elle est entraînée mécaniquement par la colonne d'air chaud ascendante. Mais puisque la fumée ne monte qu'à ces deux conditions, il faut qu'elles soient remplies, et qu'elles ne soient pas contrariées par des répulsions descendantes. Or, voici quels sont les obstacles qui nuisent à une bonne évacuation de la fumée.

1° Les tuyaux de cheminées sont souvent trop larges pour le feu qu'on y fait. Un petit feu dans une grande cheminée n'échauffe pas suffisamment la colonne d'air : le tirage est donc trop faible, et la fumée très-imparfaitement entraînée en haut.

Donc une partie au moins, savoir celle qui s'éloigne de l'axe du tuyau, pourra rentrer dans la chambre. Le remède à ce mal consiste à rétrécir les tuyaux de cheminées. Maintenant on leur donne une forme cylindrique avec 3 décimètres de diamètre au plus. Ces cheminées sont en briques, et on les ramone au moyen d'un tampon tiré alternativement par deux cordes aux deux bouts du tuyau.

2° L'ouverture de la cheminée dans la chambre est souvent trop vaste, et surtout trop élevée au-dessus du foyer. Une ouverture aussi béante admet une assez grande quantité d'air qui ne passe ni au travers du foyer, ni tout à fait dans son voisinage; or, cet air qui n'est pas échauffé se mêle à la colonne ascendante et la refroidit. Le remède, plus facile que le précédent, consiste à rétrécir le manteau de la cheminée.

3° Le tuyau peut n'avoir pas une longueur suffisante, et l'on remarque assez généralement que les cheminées de l'étage supérieur fument. Cela résulte immédiatement de ce qu'à défaut d'une longueur suffisante, il n'y a entre les deux colonnes chaude et froide qui se font équilibre qu'une trop faible différence de poids; donc le tirage sera faible, et la fumée mal entraînée. On ne peut obvier à cet inconvénient qu'en élevant le tuyau soit par un prolongement direct, soit par un appendice en tôle. On assigne en général la longueur de 5 mètres comme le minimum de ce qu'on peut donner aux tuyaux. On voit néanmoins beaucoup

de cheminées qui n'ont pas cette longueur et qui fonctionnent parfaitement. Il suffit pour cela qu'elles réunissent les autres conditions d'une bonne cheminée. Une petite largeur entre autres compense une médiocre hauteur.

Il arrive souvent qu'un tuyau débouche dans un autre; alors la longueur de celui-ci ne peut être comptée qu'à partir du point de jonction; car l'air froid du tuyau affluent se trouve toujours plus ou moins entraîné par le cours d'air du tuyau principal; or, il le refroidit, et les choses se passent comme si le tuyau qui contient une colonne chaude prenait son origine au débouché du second. Le remède ici consiste ou à boucher le tuyau affluent, ou à y entretenir du feu.

4° Certaines conditions de température et d'humidité de l'air influent sur le tirage, et par suite sur le mouvement de la fumée. Quand il fait chaud à l'extérieur, la différence de poids des deux colonnes est moins considérable; donc le tirage sera moins actif, et la fumée mal entraînée. Aussi tout le monde a-t-il fait cette remarque que le foyer brûle au mieux les jours de forte gelée. Alors la différence de poids entre les deux colonnes est la plus considérable possible; le tirage est donc énergique.

Le degré d'humidité de l'air a aussi son influence. Plus l'air est chargé de vapeur, moins il pèse à volume égal, et ces différences de poids doivent influer sur le tirage, comme on l'a déjà vu. Toutefois, il ne faut pas croire que l'air soit plus

léger dans les temps qu'on appelle humides. Alors précisément l'air contient moins de vapeur d'eau proprement dite, et sa température est généralement plus basse, et il en résulte pour lui, par ces deux raisons, une plus grande densité. Aussi, toutes choses égales d'ailleurs, c'est dans les plus beaux jours de l'été que la combustion doit se faire le plus mal; ils doivent offrir la contre-partie des jours glacés de l'hiver. Ce qui fait que la combustion est assez difficile dans les jours qu'on appelle humides, c'est d'abord que l'humidité existe à la surface des corps et gêne l'action du feu. En second lieu, pendant les jours humides la température est assez douce, ce qui ne favorise pas la différence de densité nécessaire. De plus, on compare les effets médiocres du foyer ce jour-là, à ceux des jours de gelée; or, lors de ceux-ci la combustion est plus active, par la raison que nous avons dite : le rapprochement doit donc être défavorable aux jours où il ne gèle pas.

5° Le vent, par son impulsion descendante, alors même qu'il ne frappe pas directement, refoule la fumée dans le tuyau. Lorsque la cheminée est commandée par un mur qui la dépasse notablement, on la voit souvent fumer; cela tient à ce que le vent frappe ce mur et se réfléchit dans le tuyau qu'il domine. Le remède consiste à élever la cheminée. Contre l'effort du vent, en général, on applique aux cheminées certaines fermetures qui ont pour effet de rétrécir les orifices de sortie; telles sont les *mitres*, formées de deux tuiles

accotées, ou les tuyaux de tôle en T, ou les cônes percés de petits trous. Tout rétrécissement produit, comme on sait, un accroissement de vitesse au passage, pour les gaz comme pour les liquides. Indépendamment de l'avantage de laisser moins de prise au vent, ces divers systèmes ont donc celui d'augmenter le tirage.

Mais on oppose au vent des appareils plus efficaces. Nous citerons les *têtes de loup*, qui, fonctionnant comme girouettes, se tournent toujours de telle sorte, que la gueule regarde toujours le côté opposé au vent. On cite les cheminées fermées par le haut, mais qui portent des ouvertures latérales disposées comme des jalousies; ouvertures dans lesquelles le vent ne peut s'engager dès qu'il vient de plus haut. Dans ce système rentre celui des fermetures à double chapeau conique : le chapeau supérieur est rabattu sur l'inférieur, et c'est dans l'intervalle des deux cônes que sort la fumée.

6° Enfin, la plus commune et la plus importante des causes qui produisent la fumée à l'intérieur, consiste en ce que la chambre est souvent trop bien close.

Ventilation nécessaire. En effet, il ne faut pas oublier que l'air ascendant qui sort de la pièce par le tuyau laisse un vide qui doit être nécessairement comblé par l'afflux d'un égal volume d'air. Supposons la chambre hermétiquement fermée : le vide se remplira au moyen de l'air qui descendra nécessairement par la cheminée; or, cet air sera froid et diminuera le

tirage; mais, de plus, il agira mécaniquement contre la colonne ascendante et repoussera la fumée; celle-ci rentrera donc avec lui dans l'appartement. Si la pièce, sans être rigoureusement close, l'était trop bien pour permettre à une quantité d'air suffisante d'entrer en remplacement de la colonne qui monte, l'effet que nous signalons se produirait partiellement. Pour éviter la fumée, il faut donc, dans tous les cas, laisser à l'air un accès suffisant aux jointures des portes; des bourrelets font fumer, et l'on sait qu'en général les cheminées fument dans les maisons neuves, parce que les peintures sur bois enflent les portes et les font fermer trop bien. Si l'on ne veut pas se résigner à laisser affluer l'air par-dessous les portes, il faut, de toute nécessité, recourir aux systèmes des ventouses et des *vasistas*.

Les *ventouses* sont des conduits qui prennent l'air à l'extérieur de la maison en passant sous le parquet de la chambre, et qui débouchent dans la cheminée entre deux planches; l'air qui vient par là remplace l'air ascendant. Les *vasistas* sont des vitres mobiles qui s'ouvrent et se ferment comme une porte, et par lesquelles, en les ouvrant, on laisse rentrer l'air nécessité par le tirage. Ces deux sortes d'appareils, outre l'inconvénient de faire tomber l'air froid sur les jambes et sur la tête des habitants de la chambre, ne fournissent souvent pas assez d'air pour remplacer celui qui s'en va; et il faut leur donner un supplément en entr'ouvrant les portes.

Souvent encore deux chambres contiguës ont des cheminées qui se commandent, et dont chacune ne peut prendre que dans l'autre l'air nécessaire à son foyer. Or, il est bien clair que si l'on fait du feu dans les deux cheminées à la fois, chacune dispute à l'autre l'air qui servirait à l'alimenter, et appelle à l'intérieur celui qui s'élève dans le tuyau. Il y aura donc nécessairement de la fumée, et les deux feux ne seront compatibles que si l'on donne à chacune des deux chambres une alimentation indépendante.

Nous verrons, dans un autre chapitre, et d'après d'autres principes, de nouvelles conditions utiles pour perfectionner le système des cheminées et du tirage.

181. Outre le mouvement de l'air déterminé par l'action des foyers, il existe toujours des déplacements d'air entre les diverses parties d'un même bâtiment, comme entre la chambre et la cheminée. Lorsque les portes ne ferment pas hermétiquement, on sent, aux jointures, des *courants d'air*, et ces courants sont encore plus sensibles au bord des fenêtres. Cela prouve qu'il se fait un échange de deux airs d'inégale densité; et le mouvement d'échange, qui serait très-faible par de larges ouvertures, devient rapide à proportion du rétrécissement de la voie.

Nous avons dit qu'un faible courant avait toujours lieu dans les cheminées même sans feu. Cela résulte de l'inégalité de température qui a toujours lieu entre l'air d'une chambre fermée et celui qui

pèse à l'orifice supérieur de sa cheminée; et c'est pour cela, sans doute, que les chambres à cheminée n'émettent pas cette odeur nauséabonde que présentent au bout d'un certain temps les chambres closes dépourvues de ce conducteur, et dont on dit qu'elles sentent le renfermé.

La température des lieux profonds étant invariable, diffère par cela même de celle qui règne à la surface de la terre; donc, il doit se produire des courants dans les puits qui mettent le fond en rapport avec la surface, et dans les galeries souterraines sous lesquelles ces puits débouchent. Aussi profite-t-on de ce fait habituel pour aérer ces souterrains. Beaucoup des puits de Paris traversent les catacombes sur lesquelles repose cette ville; or, on a ménagé un grand nombre d'ouvertures dans ces puits, en insérant, dans la maçonnerie, de simples goulots de bouteilles. Il en résulte une ventilation continue qui, sur quelques points, est même très-violente.

182. Nous aurions à parler ici de l'action de l'air sur les moulins, les voiles des navires, les cerfs-volants; mais nous l'avons expliquée d'avance quand nous avons analysé cette action au point de vue mécanique, et comme application remarquable du principe du parallélogramme des forces. Nous allons terminer ce sujet par la *description des voitures atmosphériques.* Rails-roads atmosphériques.

Qu'on imagine un immense tuyau de fonte couché sur la longueur d'un chemin, et dans lequel peut se mouvoir un piston. Qu'on laisse ou-

verte l'une de ses extrémités près de laquelle le piston se trouvera placé d'abord, tandis que l'extrémité opposée sera close, mais communiquera par un tube avec le bas d'un corps de pompe à air vertical; de telle sorte que le jeu de cette pompe puisse faire le vide dans le tuyau horizontal. Il est évident que dès que la pompe aura commencé à faire le vide, il y aura sur les deux faces du piston horizontal deux pressions inégales; savoir, la pression atmosphérique extérieure, et celle de l'air raréfié au dedans du tuyau. Le piston devra donc se mouvoir dans ce tuyau horizontal en marchant vers la pompe aspirante, et il sera poussé avec d'autant plus de force que l'air sera plus raréfié. Que celui-ci le soit, par exemple, aux trois quarts, le piston marchera sous la pression des trois quarts d'une atmosphère; en lui supposant une surface d'un mètre carré, sur laquelle l'atmosphère exerce, comme on sait, une pression de 10,400 kilogrammes, on aura les trois quarts de ce nombre, ou 7,750 kilogrammes pour la puissance qui poussera le piston. Si donc, on attachait à celui-ci une résistance de 7,000 kilogrammes, comme serait un train d'une ou de plusieurs voitures, il est clair que le piston pourrait les entraîner avec lui. Le principe du mouvement est donc trouvé; il ne s'agit que de lui donner une application commode.

Or, on conçoit que tel ne serait pas le mouvement des voitures, si elles étaient entraînées avec le piston dans toute la longueur du tube horizon-

tal. Au lieu de cela, elles se meuvent au-dessus de ce tube, sur les rails d'un chemin de fer ordinaire, dont le tube occupe le milieu. Or, pour qu'elles puissent être entraînées par le piston, il a fallu établir le long du tube horizontal une rainure dans laquelle se meut une tige par laquelle le train supérieur se rattache au piston; mais il est clair que le vide serait impossible à produire, si cette fente n'était pas habituellement fermée, et ne s'ouvrait que tout juste pour offrir un passage rapide à la tige du piston en chaque point de sa course. On lui applique à cet effet une fermeture élastique qu'on nomme la soupape; cette soupape est close de telle sorte qu'elle livre passage à la tige du piston, mais se referme immédiatement après ce passage; toutefois, on conçoit que ce système soit difficilement conciliable avec une fermeture rigoureusement hermétique, de sorte que, malgré l'action de la pompe aspirante, il restera une certaine quantité d'air dans l'espace où elle tend à faire le vide; mais cette rentrée n'empêche pas que la pression extérieure ne soit largement prédominante, et ne pousse vivement le piston qui pourra entraîner une charge considérable.

Ce système a été récemment appliqué sur une longueur de 2,800 mètres, entre les villes de Kingstown et Dalkey, près de Dublin. La soupape était en cuir bardé de fer, et ne permettait qu'un vide assez imparfait; celui-ci était produit par une pompe à vapeur de la force de 100 chevaux.

On a proposé de remplacer la soupape de cuir par un système de deux tubes en étoffe imperméable, gonflés d'air comprimé, et s'appuyant l'un contre l'autre comme les lèvres d'une bouche fermée. La tige motrice, taillée en lentille, les sépare aisément ; mais elles se rapprochent avec une grande perfection. Ce mode de fermeture, qui n'a pas encore été essayé en grand, paraît théoriquement préférable ; toutefois, il n'est peut-être pas à l'abri de toute objection, et d'autres systèmes lui disputent la place. Nous n'avons pas à discuter ici les avantages ou les défauts comparatifs des divers modes de fermeture ; nous ne voulions que signaler l'emploi de la pression atmosphérique comme moyen de transport.

Depuis l'essai de Kingstown, on a imaginé de substituer l'action de l'air condensé à celle de l'air raréfié, et l'on conçoit en effet qu'un piston qui serait pressé d'un côté par une atmosphère, et de l'autre par trois atmosphères, serait dans le même cas que s'il était pressé par deux seulement d'un côté, tandis que le vide aurait lieu sur l'autre face. On pourrait, au moyen d'une machine à vapeur, comprimer l'air tout comme on le raréfie, et ce système, qui n'a pas encore pour lui la sanction de l'expérience en grand, offrirait peut-être des avantages sur le système du vide (1).

(1) Au moment où nous écrivons ceci, on se met en mesure d'exécuter aux frais de l'État l'essai du système atmosphérique dans une plaine voisine de Versailles.

La substitution des rails-roads atmosphériques aux voies à locomotives, est une question presque purement économique dont nous n'avons pas à nous occuper ici. Nous ferons remarquer seulement que, dans le système atmosphérique, on peut, sans aucun danger, admettre des pentes assez considérables et des courbes d'un rayon beaucoup plus petit que ceux admis jusqu'à présent. Toutefois, cette faculté trouve dans la rigidité du piston une limite infranchissable, de telle sorte que, sous le rapport des courbes et des pentes, le rail-road atmosphérique jouit de beaucoup moins d'avantages que certains chemins de fer à locomotives perfectionnés, parmi lesquelles le système de M. de Jouffroy tient le premier rang.

CHAPITRE XV.

DES DILATATIONS.

Tous les corps se dilatent.

183. Tous les corps se dilatent par une augmentation de température, et se contractent dans le cas contraire. La dilatation varie de l'un à l'autre; et en ce qui concerne les liquides et les gaz, elle a pour effet de changer notablement leur densité, et, par suite, de produire des courants. La dilatation des enveloppes solides se fait de la même manière que si ces enveloppes étaient des solides pleins de mêmes dimensions. La dilatation en volume offre, d'ailleurs, un coefficient triple de celui de la dilatation linéaire. De plus, celle des solides se produit toujours avec une puissance irrésistible.

La dilatation est assez régulière pour les solides entre 0° et 200°; pour les liquides, elle est très-irrégulière; pour les gaz, elle est parfaitement uniforme, et le coefficient de dilatation est le même pour tous : c'est 0,3665 du volume à zéro. Il en est de même des vapeurs, tant qu'elles sont soumises à la pression constante de l'atmosphère. Tels sont les principes qui régissent les diverses applications que nous allons exposer dans ce chapitre.

184. Nous n'entrerons dans aucun détail sur le thermomètre vulgaire; nous signalerons seulement le moyen qu'on emploie pour faire pénétrer dans sa boule le mercure qui se refuserait à entrer immédiatement par un tube capillaire. On fait chauffer la boule, ce qui dilate l'air contenu dans son intérieur. Cet air est donc chassé en grande partie au dehors. Au moment où la boule est le plus chaude, on plonge le bout du tube dans un bain de mercure. A mesure que la boule se refroidit, et avec elle l'air qui occupe toute la capacité de l'instrument, cet air se contracte et laisse un vide dans lequel le mercure monte progressivement par l'effet de la pression extérieure. C'est ainsi qu'une partie de la boule s'emplit de mercure. Alors on fait fortement chauffer celui-ci; il se forme de la vapeur qui, par son élasticité, chasse l'air encore contenu dans l'appareil; on plonge le tube dans le bain, et le refroidissement de l'appareil qui condense la vapeur mercurielle permet à l'air extérieur d'exercer sa pression de manière à achever de remplir l'instrument d'un seul coup. Comment on emplit le thermomètre.

185. Il existe diverses sortes de thermomètres à *maximum* et à *minimum*, qu'on trouve décrits dans tous les traités. Nous nous contenterons de signaler les thermomètres à *maximum* et à *minimum* de M. Walferdin, qui sont les plus parfaits et les moins connus.

Les thermomètres à *maxima* et à *minima* sont employés surtout pour connaître les températures

normales des lieux profonds, et où l'homme ne saurait pénétrer par lui-même. Ainsi, on les plonge dans la mer à diverses profondeurs, et dans les nappes d'où partent les colonnes ascendantes des puits artésiens.

Pyromètre à cadran.

186. La dilatation des métaux est employée pour former des instruments qui mesurent les hautes températures; ces instruments portent le nom de pyromètres. Le pyromètre des fours à porcelaine est une barre métallique appuyée contre un obstacle très-fixe et mobile par l'autre extrémité. Celle-ci butte contre le petit bras d'un levier à aiguille, dont le plus grand promène sa pointe le long d'un cadran; les diverses positions de cette pointe indiquent autant de dilatations différentes. L'appareil est placé dans l'intérieur des fours; mais l'extrémité mobile saille au dehors et agit sur l'aiguille. On a déterminé depuis longtemps, par expérience, quelles indications de l'aiguille correspondaient aux conditions les meilleures pour produire tel ou tel effet. Ainsi, à l'inspection du cadran dans chaque cas donné, on reconnaît, non pas quelle température règne dans le four, mais si la température nécessaire à produire tel effet voulu n'est pas encore atteinte ou est déjà dépassée; et l'on dirige, d'après cette indication, la conduite du feu. La dilatation dans les hautes températures n'est nullement proportionnelle aux quantités de chaleur reçues, mais dans un pyro-

mètre à barres bien fait, à des températures égales correspondent des allongements égaux de la barre, et des positions identiques de l'aiguille.

Nous signalerons aussi le pyromètre de Wedgwood, dans lequel les températures sont mesurées par les divers enfoncements que prennent, entre des barres convergentes, de petits cylindres d'argile qu'on a mis dans la source de chaleur qu'il s'agit de mesurer. Cet instrument est inexact, par cette raison entre autres que les petits cylindres ne peuvent jamais être rigoureusement homogènes, et séchés dans les mêmes circonstances, ce qui rend leur retrait fort variable. De plus, la température du four demeurant constante, le retrait de l'argile continue tant qu'elle est plongée dans la source de chaleur; les cylindres ne peuvent donc indiquer, par leur retrait, une température uniforme. Pyromètre de Wedgwood.

187. Malgré la faible dilatation des métaux comparativement à celles des liquides et des gaz, on a, dans le thermomètre de Bréguet, un appareil d'une excessive sensibilité. Il se compose, comme on sait, d'un ruban étroit et très-mince, formé de trois lames de platine, d'or et d'argent, soudées ensemble, et que l'inégalité de leur dilatation fait tordre dans un sens ou dans un autre. Le mouvement de torsion est répété et amplifié par une aiguille qui se meut autour d'un cadran; la graduation de celui-ci est faite par comparaison, avec un thermomètre à mercure. Le ruban métallique est tourné en hélice autour d'une petite colonne Thermomètre de Bréguet.

dont le sommet fixe l'une des extrémités de la lame; c'est l'extrémité inférieure qui porte l'aiguille. Cet instrument est d'une sensibilité extrême; il est influencé à plusieurs décimètres de distance, par la chaleur de la main.

Applications diverses de la dilatation des solides.

188. Tout le monde sait que lorsque les flacons de cristal offrent quelque résistance à la main qui veut les déboucher, on triomphe de cette résistance en chauffant extérieurement le goulot, soit en en approchant des charbons ardents, soit en le frottant avec vivacité. Le goulot se dilate par la chaleur, avant que celle-ci ne pénètre jusqu'au bouchon, et puisque les enveloppes creuses se dilatent comme si elles étaient pleines, le diamètre intérieur du goulot augmente avant le diamètre du bouchon, ce qui amène une séparation facile.

189. Lorsque les charrons garnissent de fer les jantes en bois des voitures, ils appliquent ces barres à chaud. Le refroidissement de la garniture diminue la circonférence qu'elle forme autour de la roue; d'où il résulte que les jointures des jantes se resserrent, conformément au but qu'on se propose.

190. Une des applications les plus célèbres de la dilatation des métaux par la chaleur, et de leur irrésistible contraction par le refroidissement, est celle qui fut faite par Molard, pour redresser les murs d'une salle du Conservatoire des Arts et Métiers, à Paris. Chargés d'un poids trop considérable par les étages supérieurs, ces murs avaient

dévié de leur aplomb, et tendaient à se renverser en dehors. Pour les ramener à leur position verticale, on perça de distance en distance près du plafond, des trous à travers lesquels furent disposées des barres de fer. Les bouts saillants de ces barres furent tournés en vis, et reçurent de forts boulons qui furent solidement serrés contre les murailles. Cette disposition qui aurait empêché une déviation plus complète est analogue à celle des esses qui servent à retenir les tuyaux de cheminées isolées; mais tel n'était pas le but de l'opération. On chauffa fortement les barres à l'intérieur, ce qui les força de s'allonger; les boulons se trouvèrent de la sorte éloignés des murailles, et l'on put les rapprocher en enfonçant davantage les écrous. Par le refroidissement les barres se contractèrent, et produisirent une traction sur leurs extrémités; les boulons se trouvèrent donc poussés contre les murs, que cet effort releva d'une quantité assez petite. En répétant plusieurs fois cette opération, on finit par relever complétement ces murs dans lesquels on laissa les barres engagées. Un redressement rapide et brusque, quand bien même il eût été exécutable, aurait certainement ébranlé et compromis l'édifice.

191. On profite de la puissante poussée qu'offre la dilatation des métaux pour former des empreintes dans les matières les plus solides. Qu'on place un flan d'argent entre deux poinçons terminant deux barres de fer, lesquelles sont appuyées par leurs deux autres bouts contre des arrêts in-

vincibles, et qu'on chauffe fortement les deux barres, elles appuieront sur le flan et y produiront des empreintes comme le balancier monétaire.

Réciproquement, on peut par la dilatation pousser et renverser des appuis très-résistants. Il arrive tous les jours que des barres de fer scellées dans des pierres fendent celles-ci en se dilatant; une résistance trop grande de la part du solide produirait une torsion dans la barre.

Précautions contre ses effets.

192. Pour parer aux effets destructeurs de la dilatation dans les grandes surfaces métalliques composées de plusieurs pièces juxtaposées, on donne du jeu à ces pièces, de manière à leur permettre de glisser les unes sur les autres, ou bien on établit entre elles un espace qu'elles ne devront pas combler. En voici plusieurs exemples.

La colonne de la place Vendôme, à Paris, se compose de plusieurs pièces de bronze en hélice, qui forment un développement de 264 mètres; en supposant que de l'hiver à l'été la température variât entre les limites extrêmes — 15° et + 33°, ces 48° formeraient une somme de dilatations égale à 20 centimètres. On conçoit facilement les torsions et les brisures qui résulteraient de ces variations de longueur. Pour y obvier, on a laissé entre les différentes pièces dont se compose l'hélice totale, des intervalles suffisants pour que la dilatation de chaque pièce puisse s'y produire à l'aise. Il faut pour chaque mètre un jeu d'environ trois quarts de millimètre. Les petits inter-

valles en question ne sont pas sensibles au coup d'œil.

On donne un jeu analogue aux barres qui composent les rails des chemins de fer. Il est facile de remarquer, en hiver surtout, que les extrémités adjacentes de ces barres, ne sont pas contiguës. De l'été à l'hiver, le chemin de fer de Paris à Rouen, sur une longueur de 136 kilomètres, varie d'environ 50 mètres en moyenne.

Les tuyaux de conduite en fonte, en plomb, ou en zinc qui servent à la conduite des eaux, sont ajustés de manière à ce qu'en s'engageant les uns dans les autres, ils puissent glisser dans une certaine étendue sans néanmoins se disjoindre. Pour les tuyaux qui courent sous la terre à une certaine profondeur, la précaution devient inutile, parce que la température de leur milieu ne varie pour ainsi dire pas de l'été à l'hiver. La différence ne va pas à 5°, et elle peut être beaucoup moindre, à une profondeur de deux mètres. Cela ne donne pas un millimètre de dilatation possible sur un tuyau de 7 mètres.

Les toits en zinc sont formés de feuilles qui subissent de très-grandes variations de température d'une saison à l'autre, et le zinc est le plus dilatable de tous les métaux. Un toit de zinc de 10 mètres de longueur, peut varier de l'été à l'hiver d'une quantité qui ne va pas à moins de 12 millimètres. Pour donner au métal le jeu convenable, les feuilles sont disposées de manière à pouvoir glisser par leurs bords; ces bords sont engagés l'un

dans l'autre par un bourrelet fait exprès. Si les feuilles étaient clouées l'une à l'autre, la dilatation arracherait les clous.

On laisse du jeu aux diverses pièces qui composent une grille, sans quoi une porte qui ferme bien pendant l'hiver ne pourrait fermer dans l'été. Il faut aussi que les barres transversales aient du jeu dans les murailles ou les culées contre lesquelles elles s'appuient, lorsque les grilles ont une grande longueur.

Les chaînes des ponts suspendus sont sujettes à des variations de longueur qui modifient la position du tablier; mais il n'en résulte aucun déplacement incommode. Les chaînes qui passent par-dessus les culées pour aller se perdre sous terre dans un massif de maçonnerie inébranlable, glissent sur des rouleaux, lorsqu'elles s'allongent ou se contractent.

Règle de Borda.

193. Lorsqu'on a procédé à la mesure du méridien, on s'est servi pour mesurer les bases de règles métalliques en platine. Or, ces règles ne conservaient pas la même longueur, puisque les dimensions en variaient continuellement avec les températures. Sans doute les différences étaient excessivement faibles, mais quand il s'agissait de prendre une mesure très-précise, et que ces différences devaient s'accumuler par la répétition continuelle, il était de la plus haute importance d'en tenir compte; or, c'est ce qu'on fait aisément par la connaissance du coefficient de la dilatation du platine combinée avec la température de la règle.

Mais sans prendre la température et sans faire aucun calcul, on pouvait reconnaître à chaque instant l'étendue de la dilatation. Pour cela, qu'on imagine une règle principale que nous avons supposée de platine, à laquelle se trouve appliquée une règle de cuivre de même longueur à très-peu près. Ces deux règles sont fixées d'une manière invariable par un de leurs bouts; par l'autre extrémité le cuivre peut glisser sur le platine. Sur la ligne de jonction en *b*, se trouve un vernier; c'est-à-dire que 19 très-petites divisions égales du platine, sont couvertes par 20 divisions du cuivre. Si le zéro du platine avance par l'effet de la dilatation, le zéro du cuivre avancera aussi, mais davantage, parce que la dilatation du cuivre est plus grande que celle du platine, dont elle est sensiblement le double. Si donc le platine s'alonge de 6 divisions, le zéro du cuivre avancera de 12; il sera donc en avance sur le zéro du platine de 6 divisions; donc à l'inspection des zéros, on reconnaîtra l'allongement du platine. L'emploi du vernier a pour but de faire apprécier les petites fractions des divisions.

On doit comprendre pourquoi toute mesure doit être ramenée à une température fixe. Si l'on mesurait une longueur déterminée avec un mètre de cuivre, que la mesure fût prise à des époques et à des températures différentes, et qu'elle dût l'être avec une très-grande précision, on trouverait en général autant de valeurs diverses qu'on aurait Réduction des mesures à 0°.

répété de fois l'opération du mesurage. La mesure d'une longueur n'est donc rien d'absolu ni de précis, et pour avoir quelque chose de déterminé et de fixe, il faut ramener à une température convenue la règle métallique qui sert de terme de comparaison. C'est ce qu'on fait en calculant ce que devrait être la mesure trouvée, si la règle était à la température constante de zéro. Supposons qu'il s'agisse, par exemple, d'une règle de cuivre jaune, et qu'on opère à une température de 22°. Pour 22°, le cuivre se dilate de $\frac{22}{51800}$ de sa longueur à zéro; un mètre à 0°, passant par la température 22°, s'accroîtra de $\frac{22}{51800}$ de mètre; et x mètres à zéro supposés la vraie longueur de la ligne mesurée, à laquelle on a trouvé n mètres à 22°, seront devenus $x+\frac{22}{51800}x$, d'où la relation :

$$x+\frac{22}{51800}x=n\ldots\text{et } x=\frac{51800\,n}{51800+22}$$

soit $n=75^{m},352$; il viendra $x=75,319$; ce qui fait une différence de 33 millimètres en moins. Du reste, on reconnaîtra aisément que la nécessité d'une telle correction ne se présentera que dans des circonstances très-rares; on ne juge pas même utile de l'employer quand on fait usage, pour mesurer de grandes lignes, de la chaîne d'arpenteur, qui se compose de tringlettes en fer.

Compensateur des horloges.

194. Mais c'est surtout dans son influence sur la marche des instruments de précision, que la variation de volume due aux changements de température mérite d'être étudiée. La chaleur change les dimensions de toutes les pièces des montres et des horloges; elle en altère donc es-

sentiellement la marche. En hiver, le balancier métallique qui sert de régulateur aux horloges se raccourcit par le froid; dans l'été au contraire, il s'allonge par l'effet de la chaleur; d'où il suit que les battements seront plus rapides et plus nombreux dans le premier cas, plus lents et moins fréquents dans le second; donc, enfin, l'horloge devra avancer en hiver et retarder en été.

Pour obvier à ces modifications perturbatrices, on a eu recours à différents moyens qui ont tous pour objet immédiat de conserver à la tige du balancier, ou plutôt à la distance du centre d'oscillation du système par rapport au point de suspension, une longueur constante. C'est ce qu'on réalise suffisamment, en maintenant à sa place le centre de gravité de la lentille. Nous allons décrire les trois principaux systèmes qui ont été proposés dans ce but.

Compensateur à mercure.

L'artiste anglais Graham a imaginé de remplacer les lentilles ordinaires par un vase contenant du mercure. Si la tige métallique du balancier s'allonge par la chaleur, le mercure augmentera aussi de volume, et comme il s'appuie par le bas contre le fond du vase, sa dilatation aura pour effet de relever sa surface, et par suite son centre de gravité. De cette manière, ce centre pourra être reporté en haut, autant qu'il a été abaissé par l'allongement de la tige. L'augmentation en hauteur d'une colonne de mercure assez courte, semble ne pouvoir compenser l'allongement produit par une tringle de fer beaucoup

plus considérable; mais il faut remarquer que, dans les mêmes circonstances, le mercure se dilate beaucoup plus que le fer; quelle que soit la longueur de la tige, la dilatation d'une colonne de mercure beaucoup moins longue pourra donc établir la compensation.

Nous faisons rentrer dans ce système le pendule Robert, qui se compose d'une tige en platine et d'une lentille en zinc, ce dernier métal étant beaucoup plus dilatable que le premier.

Compensateur à lames. Un second système consiste à disposer transversalement à la tige du balancier une lame composée analogue à celle du thermomètre de Bréguet, mais beaucoup plus épaisse, et portant à ses extrémités deux petites masses susceptibles d'ailleurs d'être rapprochées ou éloignées. Quand la température s'élève, la lame composée se tord dans un sens et relève les masses, ce qui relève en haut le centre de gravité du système : si, au contraire, la température s'abaisse, la torsion a lieu en sens contraire, et le centre de gravité est déprimé. Si donc la tige s'allonge par une chaleur croissante, ce qui abaisse le centre de gravité, la torsion qui relèvera la lame et les masses compensera cet abaissement; l'effet inverse aura lieu dans le cas contraire, et le but sera également atteint.

Mais le mode de compensation le plus répandu et le plus important consiste dans l'emploi des balanciers à châssis.

Compensa- Concevons un châssis *bpqd*, composé de trin-

teur à châssis.

gles de fer, et soutenu par la petite tringle *as* de même métal. Sur la base *pq* se trouvent implantées deux tringles de cuivre jaune *xm*, *yn*, qui supportent une traverse *mn*, au milieu *o* de laquelle est suspendue la tringle de fer *o*G qui supporte immédiatement la lentille. Supposons une augmentation de température. Les tringles de fer S*a*, *bp*, *o*G, s'allongeront, et le centre de gravité G s'abaissera. Mais les tringles de cuivre *xm*, *yn*, qui sont appuyées par leur extrémité inférieure sur la base *pq*, ne pourront s'allonger que de bas en haut; elles relèveront donc la traverse *mn*, et le point *o*; donc, par suite, le centre de gravité G sera relevé aussi. Il ne s'agit que de disposer les pièces de l'appareil de telle sorte que les tringles de cuivre produisent un relèvement égal à la dépression produite par les tringles de fer. Les premières sont, il est vrai, plus courtes que la somme des secondes; mais comme le cuivre est plus dilatable que le fer, on conçoit que la compensation puisse être établie.

Toutefois, en examinant la chose de près, on reconnaît que la compensation ne saurait avoir lieu avec deux châssis seulement, ou trois longueurs de fer, contre une de cuivre, parce que la dilatation de ce dernier métal n'est pas assez considérable. Les coefficients de la dilatation du fer et du cuivre sont respectivement $\frac{1}{846}$ et $\frac{1}{818}$. Or, appelons f, f', f'', les trois longueurs de fer, S*a*, *bp*, *ob*, qui se dilatent séparément, et dont les dilata-

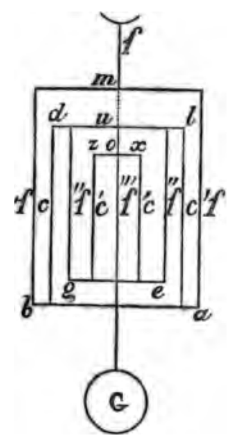
tions s'ajoutent pour faire l'allongement total du balancier; appelons aussi c la longueur de chaque tringle de cuivre, qui à elles deux ne fournissent qu'une dilatation ascendante. Il faut pour la compensation, que l'allongement du cuivre égale celui du fer; ce qui fournit l'équation :

$$\frac{1}{515}c = \frac{1}{846}(f+f'+f'').$$

Or, $f'+f''$ donnent une valeur plus grande que $2c$, puisque chacun de ces termes séparément est plus grand que les tringles de cuivre; d'où, en appelant k la différence, on a... $f'+f''=2c+k$, et $\frac{1}{515}c=\frac{1}{846}(f+2c+k)=\frac{1}{846}(f+k)+\frac{2}{846}c=\frac{1}{846}(f+k)+\frac{1}{423}c$. Or cette relation est impossible; car la dernière fraction $\frac{1}{423}c$ est déjà plus grande que le premier membre $\frac{1}{515}c$: donc avec le terme $\frac{1}{846}(f+k)$, elle doit, à plus forte raison, l'emporter sur le premier membre : donc, enfin, la compensation est impossible dans ces premières conditions.

Mais employons le second système représenté dans la figure ci-contre. Le châssis enveloppant est de fer comme dans le cas qui précède, ainsi que la tige centrale qui porte la lentille. Les tiges intérieures sont alternativement de cuivre et de fer, ainsi que l'indiquent respectivement les initiales c, f; voyons d'abord comment fonctionnera l'appareil. Les tiges de fer f, f' s'allongeant, abaisseront la traverse ab, mais les tringles de cuivre c, relèveront ld, et par suite eg; cette dernière aura d'abord été abaissée par l'allongement f''. Les tringles c' remonteront xz, et par suite le point o, avec la lentille G; mais ce dernier point aura été

préalablement abaissé par l'allongement de f'''. L'allongement descendant total se compose donc



de $f+f'$ qui abaissent ld, puis à partir de ld, f'' qui abaisse zx; puis enfin f''' à partir de zx: en somme on a $f+f'+f''+f'''$ pour la quantité totale dont descend le centre de gravité de la lentille. D'un autre côté, ce centre est relevé par la traverse zx, soulevée elle-même par l'allongement de c'; or, les points inférieurs de c' le sont par l'ascension de ld, et celle-ci représente la dilatation ascendante des tringles c. Donc $c+c'$ forme la quantité totale dont le centre de gravité de la lentille se relève. On a donc l'équation :

$$\tfrac{1}{818}(c+c')=\tfrac{1}{846}(f+f'+f''+f''').$$

Or, on a comme ci-dessus $c<f' \ldots c'<f''$; d'où $c+c'<f'+f''$; ou $f'+f''=c+c'+k$. — Il en résulte :

$$\tfrac{1}{818}(c+c')=\tfrac{1}{846}(f+f'''+c+c'+k)$$

ou $\tfrac{1}{818}(c+c')=\tfrac{1}{846}(c+c')+\tfrac{1}{846}(f+f'''+k)$.

Cette équation qui est en général possible, puisque le premier membre est plus grand que le premier terme du second membre, conduit à :

$$\tfrac{1}{846}(f+f'''+k)=\left(\tfrac{1}{818}-\tfrac{1}{846}\right)(c+c')=\tfrac{331}{818.846}(c+c'),$$

d'où $(f+f'''+k)=\tfrac{331}{818}(c+c')$.

Mais on reconnaît aisément que k qui est l'excès de $f'+f''$ sur $c+c'$, ou $f'-c+f''-c'=mu+uo=om$, de sorte que $f+f'''+k$ font la longueur totale

SG du pendule, jusqu'à la lentille. Soit λ cette longueur; il vient :

$$\lambda = \tfrac{331}{818}(c + c'),$$

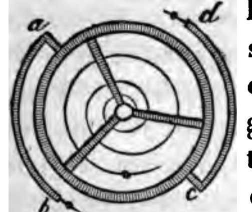
d'où, enfin, $c + c' = \tfrac{818}{331}\lambda = 1{,}5559\,\lambda$. — Telle doit être la somme des longueurs des tringles de cuivre de chaque côté par rapport à la longueur totale de la tige de fer (1).

Toutefois, ce n'est qu'une compensation approchée, car ces divers mouvements déplacent un peu le centre d'oscillation. Aussi, pour corriger cette erreur, comme pour donner d'abord au balancier cette première longueur qui convient au mécanisme propre de l'horloge, et que la compensation des tringles doit rendre constante, on modifie par tâtonnement et au moyen d'une poulie à vis la longueur des châssis intérieurs, jusqu'à ce que la marche de l'horloge, comparée à celle d'un régulateur, se trouve parfaitement uniforme dans un lieu très-froid et dans une étuve à 40°.

Balancier des montres. 195. Dans les montres, le mouvement imprimé par le grand ressort est régularisé par le ressort spiral et le balancier que celui-ci entraîne avec lui. La chaleur, en allongeant le ressort et les rayons du balancier, ralentit par cela même les

(1) On trouve, dans le système Graham, les conditions d'équilibre d'une manière analogue. Soit λ la longueur totale du tube de verre qui fait tige, h la profondeur du mercure, dont le centre de gravité est élevé de $\frac{h}{2}$. La dilatation relative du mercure, dans un vase de verre, est à la dilatation du verre en tube :: $\frac{1}{65}$: $\frac{1}{1161}$; on aura donc l'égalité $\frac{1}{1161}\lambda = \frac{1}{65}\cdot\frac{h}{2}$... d'où $h = 0{,}112\,\lambda$.

oscillations et la marche de la montre. Pour remédier à cet effet, on applique au balancier deux



lames courbes, *ab*, *cd*, composées de deux métaux, comme dans le thermomètre de Bréguet, et terminées par deux petites masses. Le métal le plus dilatable étant en dehors, l'effet de la chaleur est de rendre les lames plus convexes, et de rapprocher les petites masses du centre d'oscillation. Or, alors comme dans un pendule plus court, les oscillations deviendront plus rapides. Le principe de la compensation est donc appliqué; mais il faut régler le balancier une première fois, ce à quoi on parvient en disposant les petites masses au bout des lames, par des tâtonnements qui mènent à la position convenable.

196. La dilatation des liquides trouve une application des plus importantes dans l'appréciation des volumes très-divers que peut prendre une même masse selon la température, et cette observation est particulièrement applicable à l'alcool. De 0° à 100°, l'alcool se dilate de $\frac{1}{9}$ de son volume primitif, et cette dilatation fort considérable est une des raisons qui font employer l'alcool dans des thermomètres qu'on fait d'ailleurs assez larges. Or, on conçoit qu'un hectolitre d'alcool à zéro passant à une température plus élevée, débordera d'une quantité assez importante, et qu'un hectolitre à 25° sera notablement différent d'un hectolitre à zéro. C'est un point dont il faut tenir compte

Dilatation de l'alcool.

dans les prix, et sur lequel, à défaut de cette observation, l'erreur ou la fraude peuvent donner lieu à un préjudice qu'il faut prévenir. Un hectolitre d'alcool en hiver, à une température de — 3°, diffère d'un hectolitre d'alcool pris en été à une température de + 22°, de $\frac{22}{900}$ de son volume, ou de 2$^{\text{lit.}}$,444. En d'autres termes, à raison de 1 fr. 50 c. le litre, un hectolitre d'alcool doit coûter 150 fr. à 0, et à 25° il ne doit coûter que 145 fr. 83 c. On tient compte, aux barrières d'octroi des villes, de cette différence.

Calorifères à eau chaude. 197. La dilatation des liquides, et par suite le mouvement ascendant que prend dans une masse le liquide chauffé au fond d'un vase, sont mis à profit pour obtenir une circulation d'eau chaude dans des tuyaux dont les deux extrémités communiquent avec une chaudière. A mesure qu'elle se chauffe au fond de celle-ci, l'eau s'élève dans un tuyau qui circule à volonté et qu'elle échauffe; refroidie par ce contact, elle retombe dans la chaudière, pour s'y chauffer de nouveau. C'est ainsi qu'on exécute des calorifères comme celui que présente la figure ci-contre, pour les serres chaudes en particulier; mais on a substitué à ce système les calorifères à vapeur, dont il sera question plus loin.

198. La dilatation des gaz, et par suite la légèreté spécifique qui en résulte, sont le principe du tirage des appareils à foyer, comme nous l'avons expliqué ci-dessus. Mais nous allons signaler ici

un usage très-intéressant de la connaissance qu'on a acquise de leur coefficient de dilatation.

On n'avait jamais obtenu jusqu'à présent d'instrument propre à mesurer les hautes températures, comparativement aux indications du thermomètre ordinaire. Même en faisant abstraction de la difficulté de trouver une enveloppe convenable, le mercure cesse de se dilater régulièrement au delà de 300°, et de plus, comme il entre en ébullition vers 350°, il est clair qu'il ne peut servir au delà comme indicateur. Pour tous les autres liquides, les difficultés sont plus grandes encore. Si l'on compare au thermomètre jusqu'à 300°, un pyromètre métallique ou tout autre de nature solide, on n'a d'abord que de très-faibles dilatations qui ne permettent guère d'étendre l'échelle au delà de 300°; mais de plus, il est certain que passé 200°, et surtout dans les très-hautes températures, la dilatation des solides est extrêmement irrégulière. Tous les pyromètres doivent donc être écartés par cela seul, et l'on verra plus bas à quelles énormes erreurs on avait été entraîné, dans l'évaluation des températures par ce moyen. Pyromètre à gaz.

Or, M. Pouillet a imaginé de faire servir à la mesure des hautes températures la dilatation des gaz, qui offre une régularité constante, ce qui tient, comme on sait, à ce que ces corps ne sont pas influencés par les causes qui dérangent la dilatation des solides et des liquides, savoir le voisinage de leur changement d'état.

Son appareil se compose d'une boule creuse de

platine B de 4 à 5 centimètres de diamètre, surmontée d'un tube très-court de même métal. Dans celui-ci s'engage un tube d'argent *t* qui se recourbe et pénètre dans un tube de verre S, dit *réservoir de dilatation*. Celui-ci, qui est extérieurement gradué, contient du mercure à une certaine hauteur; ce tube communique avec un autre tube R, ouvert à sa partie supérieure, et contenant également du mercure; à leur jonction se trouve un robinet *r* par lequel on peut faire écouler le métal. En supposant que les deux colonnes soient d'abord de niveau, l'inégalité s'établira nécessairement quand l'air de la boule, dilaté par la chaleur, poussera et déprimera le mercure du réservoir de dilatation; mais en ouvrant le robinet *r* on fera écouler du mercure, et tant par la diminution de la colonne du tube R, qui pèsera moins sur le gaz, que par l'expansion qu'il prendra dans le tube S débarrassé aussi d'une portion de son mercure, le gaz se trouvant déchargé et exerçant une moindre tension, il pourra ne plus élever la colonne mercurielle de R au-dessus de celle de S, ou, en d'autres termes, l'écoulement par le robinet *r* ne tardera pas à amener le niveau des colonnes dans ces deux tubes. Si, au contraire, le gaz venait à se contracter dans la boule par le refroidissement à tel point que le mercure s'élevât dans le tube S plus que dans le tube R, on ouvrirait le robinet *g*, qui donnerait accès au mer-

cure contenu dans le tube T, dit *réservoir de remplissage ;* et dès lors le tube R ayant du mercure en quantité suffisante, le niveau se rétablirait. Ainsi, dans tous les cas, l'air dilaté ou raréfié qui fonctionne dans la boule et dans le réservoir de dilatation, peut toujours, à quelque température qu'il soit, rester sous la pression atmosphérique extérieure. Cette condition, qui simplifie les expériences et les calculs, a pour but principal de soustraire la boule de platine à une pression intérieure trop grande; car dans le cas où ce métal est porté au rouge, cette pression pourrait la déformer. De la sorte, les deux pressions, intérieure et extérieure, auxquelles elle est soumise sont égales.

Cela posé, admettons que tout l'appareil soit mis à 0°, et soit n le nombre de divisions occupé par l'air jusqu'au niveau du mercure dans le réservoir de dilatation. Si ensuite on place la boule dans la source de chaleur qu'on veut évaluer, l'air se dilatera, et déprimera le mercure; soit n' le nombre de divisions correspondant à ce cas, après que le niveau des colonnes aura été établi. La différence $n'-n$ des deux lectures représente manifestement la dilatation de l'air enfermé dans la boule, lorsqu'on l'a élevé de 0° à la température t°; or, comme d'ailleurs tout l'appareil moins la boule est supposé resté à 0°, ce volume $n'-n$, est celui de la dilatation réduit à 0°. Soit B le volume de la boule à 0°, k le coefficient de dilatation du platine, α celui de l'air, et $\delta=n'-n$, le volume de la boule sera devenu $B(1+kt)$, et le volume

actuel δ qui est à zéro, est la réduction à zéro de $\delta(1+\alpha t)$, volume de l'air à t°. D'ailleurs le volume total de l'air dilaté est $B(1+\alpha t)$; donc, puisque cet air à t° occupe la boule dilatée, plus un volume qui réduit à 0° donne δ, on a l'équation :

$$B(1+\alpha t)=B(1+kt)+\delta(1+\alpha t);$$

on en tire... $t=\frac{\delta}{\alpha B-(Bk+\alpha\delta)}$.

Telle est la formule qui donne les températures en fonction des coefficients et des volumes; voyons de quelle manière on détermine ces divers éléments.

On a d'abord..... $\alpha=0{,}003665$, $k=0{,}0003$ (valeur un peu douteuse, mais qui a peu d'influence). Le volume B de la boule de platine, y compris son petit tube, est déterminé par le poids de l'eau qu'elle contient à une température connue; il en est de même du volume a du tube d'argent dont nous allons avoir besoin.

La connaissance de la valeur δ implique celle du nombre n, pour observer lequel il faut maintenir tout l'appareil à zéro. Or, on peut se dispenser de faire cette expérience préalable chaque fois qu'on veut employer l'instrument. En effet, supposons qu'on ait une première fois et pour toutes, placé l'appareil dans cette condition de température, et qu'on ait observé sous la pression barométrique p le nombre m des divisions dont il s'agit, on aura pour le volume total de l'air, $B+a+m$. Sous la pression 0,76, le volume V deviendrait, comme on sait, $\frac{p}{0{,}76}V=\frac{p}{0{,}76}(B+a+m)$; d'où l'on tire... $m=\frac{0{,}76}{p}v-(B+a)$. Soit n le nom-

bre de divisions à toute autre pression p', on aura évidemment la même relation $n = \frac{0,76}{p'} V - (B + a)$. Dans cette formule p' représente la pression barométrique sous laquelle on opère dans chaque cas donné; B, a, les volumes de la boule et du tube à zéro, mesurés une fois pour toutes; enfin V, le volume, ou coefficient constant obtenu dans une expérience préalable, et multiplié par le rapport $\frac{p}{0,76}$ qui est aussi une donnée invariable. Ainsi n est une quantité parfaitement déterminée, qu'on n'a pas besoin de chercher à chaque expérience, et dont le chiffre donné une première fois, est une constante qu'on pourrait inscrire sur l'instrument, ainsi que les valeurs de B et de a. Il n'y a que n' à observer dans chaque cas donné pour avoir δ.

En se servant de son pyromètre à air, M. Pouillet est parvenu aux résultats suivants, pour les températures correspondantes aux différentes nuances de couleur que présentent les corps à partir du rouge naissant; ces températures se rapportent au thermomètre à mercure :

Rouge naissant.....	525°.
Rouge sombre.......	700°.
Cerise naissant......	800°.
Cerise.............	900°.
Cerise clair........	1000°, fusion de l'or.
Orange foncé.......	1100°.
Orange clair.......	1200°.
Blanc..............	1300°.
Blanc suant........	1400°.
Blanc éblouissant...	1500 à 1600°, fusion du fer.

Nous ferons remarquer qu'avant les expériences

faites avec ce pyromètre, on admettait, d'après les indications mal interprétées du pyromètre de Wedgwood, que la fusion du fer exigeait de 10,000 à 15,000 degrés! M. Pouillet pense qu'aucun de ses chiffres n'est en erreur de plus de 50°. Enfin, il faut remarquer que les calculs ont été faits avec une valeur de $\alpha = 0,00375$; mais la vraie valeur que nous avons donnée de ce coefficient n'introduira dans ces chiffres que des changements de peu d'importance.

CHAPITRE XVI.

DE LA CHALEUR RAYONNANTE ET DE LA CONDUCIBILITÉ.

199. La chaleur se disperse en rayons rectilignes à partir des corps qui en sont pénétrés; tous en contiennent, tous en rayonnent; seulement les plus riches en cèdent davantage, les moins riches en donnent peu : il y a donc tendance à l'équilibre, et lorsque cet état est atteint, il y a échanges égaux.

Tous les corps contiennent de la chaleur.

Il peut paraître fort étonnant d'entendre attribuer la chaleur à tous les corps, même à ceux que nous qualifions d'excessivement froids. Cette impression qu'ils nous causent ne prouve nullement qu'ils n'aient pas de chaleur, ou même qu'ils n'en aient pas beaucoup; il suffit pour que nous l'éprouvions que notre chaleur soit notablement plus considérable que celle des corps dont il s'agit; alors nous leur donnons beaucoup plus qu'ils ne nous donnent, ce qui revient à perdre, d'où résulte l'impression plus ou moins vive que nos organes subissent. On peut prouver directement l'existence de la chaleur dans la glace, ou dans les mélanges réfrigérants qui donnent des froids si énergiques. Pour ce qui est de la glace, placez un thermomètre à l'air, un jour de forte gelée, il s'abaissera par exemple à—10°. Prenez alors un

morceau de glace que vous tiendrez quelque temps dans l'intérieur d'une chambre chaude. Alors appliquez-en un morceau au thermomètre extérieur, et aussitôt vous verrez le mercure monter. Donc la glace, quoique très-froide encore, a échauffé le thermomètre.

L'évaporation de l'acide carbonique liquide produit un froid de 93° sous zéro. Or, quand l'évaporation cesse, le mercure remonte dans le thermomètre. Cela vient de ce qu'il reçoit du calorique de la part de l'air. Mais quand il est monté d'un degré seulement, il est certain qu'il a reçu de la chaleur, savoir celle qui est capable d'élever le mercure d'un degré. Donc à 92° sous zéro, les corps contiennent encore de la chaleur. Or, on ne voit aucune raison pour qu'on ne puisse substituer au nombre 92°, des températures incomparablement plus basses.

Nous éprouvons à chaque instant des effets sensibles de ce système d'échange que font tous les corps entre eux. Nous passons de l'air libre à la cave, puis de l'air à une étuve, et nous trouvons qu'il fait froid et chaud successivement. C'est que l'échange de chaleur que nous faisons avec l'air et les divers objets qui existent dans ces lieux divers, est tantôt à notre avantage, tantôt à notre détriment. Lorsqu'une personne venant du dehors quand il gèle, s'approche d'une autre personne dans une pièce très-chaude, elle fait éprouver à celle-ci une impression de froid remarquable; ainsi fait un morceau de glace qu'on approche de

la main. La personne venant du dehors et le morceau de glace donnent, mais reçoivent beaucoup plus; il y a donc perte très-sensible pour les corps ambiants.

200. Mais en passant d'un corps à l'autre, la chaleur est modifiée dans son intensité et sa direction, par l'état des surfaces. Celles-ci sont-elles polies ou blanches, elles réfléchissent une grande partie de la chaleur reçue, et s'échauffent elles-mêmes très-peu. Si les surfaces sont au contraire rugueuses et obscures, elles ne renvoient pas la chaleur, mais au contraire l'absorbent à leur compte. Les surfaces qui réfléchissent bien, émettent mal; elles sont, pour ainsi dire, peu perméables à la chaleur; celles-là au contraire émettent bien, qui absorbent beaucoup. C'est sur ces simples principes qu'on se règle pour gouverner la marche de la chaleur. Influence des surfaces.

Veut-on, par exemple, renvoyer dans la chambre la chaleur qui va battre le fond et les joues d'une cheminée? On donnera à celles-ci une surface réfléchissante; pour cela on les garnira de faïence blanche, ou de feuilles de cuivre jaune. La peinture noire qu'on leur applique souvent, est, sous ce rapport, mal entendue. On reconnaît aussi qu'il faut donner aux parois latérales une position oblique; c'est de cette manière seulement que la chaleur peut être renvoyée en avant dans la chambre: faites des joues parallèles, elles se renverront l'une à l'autre toute la chaleur que le foyer projettera sur elles.

Veut-on au contraire que la cheminée, au lieu d'échauffer rapidement la pièce, y produise et y maintienne plus longuement la chaleur? Il faudra que les parois internes soient obscures et peintes en noir. Ces parois s'échaufferont pendant que le foyer se consumera, et après son extinction, elles rayonneront à leur tour dans la chambre la chaleur mise en réserve.

Un poêle de fonte échauffera vite la pièce, un poêle de faïence plus lentement. Cela tient entre autres à ce que la surface obscure du métal rayonne mieux que la faïence lisse et polie du poêle. Mais le premier se refroidit plus vite que le second.

Veut-on échauffer rapidement un liquide contenu dans un vase mis au feu? On noircira à la chandelle le fond extérieur du vase qui devra être mis au feu; la couche de noir de fumée rendra cette surface très-absorbante. Veut-on faire refroidir rapidement après avoir retiré du feu? On noircira complétement la surface extérieure. On peut ainsi échauffer rapidement à la chandelle de l'eau contenue dans une timbale d'argent, malgré la grande chaleur spécifique de l'eau.

201. Au moyen des principes sur le rayonnement et la réflexion, nous pouvons compléter la théorie des appareils de combustion, tels que les cheminées et les poêles.

Concentration de la chaleur dans les appareils de chauffage.

Nous avons dit qu'il fallait donner un assez petit diamètre aux tuyaux de cheminées. On a d'abord pour but de ne pas mêler à l'air chaud une colonne d'air froid contiguë; mais de plus

on se propose de diminuer la surface contre laquelle frotte et se refroidit la colonne chaude ascendante; double effet qui nuit évidemment au tirage. Enfin, un tube d'un petit diamètre réfléchit et concentre la chaleur dans l'axe de la colonne.

Le rideau de tôle qui s'applique en avant des cheminées, a pour effet de réfléchir à l'intérieur la chaleur qui rayonnerait dans la chambre, et de plus d'empêcher l'accès d'une masse d'air froid. L'air qui emplit la cheminée est par là maintenu beaucoup plus chaud, et le tirage est plus énergique. Aussi l'air se précipite-t-il avec violence par l'étroit passage que le rideau baissé laisse au-dessous de lui. De plus, on sait que les courants sont d'autant plus rapides qu'ils sont plus étroits.

Un poêle produit un effet analogue. La porte est un rideau qui réfléchit et concentre la chaleur; l'air se précipite par le guichet, et le tirage est si actif, qu'une flamme de bougie se dirige horizontalement vers l'intérieur. Ouvre-t-on la porte du poêle, le ronflement cesse, le tirage s'allanguit; la chaleur n'est plus concentrée, elle s'échappe comme un liquide par un vase ouvert, et l'air froid de l'extérieur vient en masse cerner le foyer et refroidir la région ambiante.

202. Mais il y a entre les cheminées et les poêles une différence très-importante qu'il importe de signaler.

Perte de chaleur dans les cheminées.

On a dit avec raison que si les hommes s'étaient proposé ce problème : Produire avec une quantité de combustible donné, la moindre chaleur possi-

ble dans l'intérieur d'une chambre, ils l'auraient résolu complétement au moyen de nos appareils de cheminées. Et il est vrai qu'à peine le $\frac{1}{16}$ de la chaleur produite dans le foyer nous arrive. Nous avons à la vérité, quand les cheminées sont garnies de bons réflecteurs, une notable partie de la chaleur rayonnante; mais celle-ci est fort peu de chose en comparaison de la chaleur qu'emporte l'air qui monte dans la cheminée, et qui est entièrement perdue pour nous. Si l'on pouvait se débarrasser autrement de la fumée, on ferait rendre l'air chaud dans l'appartement, et même dans ce cas-là le tirage serait faible. Mais si l'on pouvait faire passer la cheminée dans l'appartement, et donner à cette cheminée de minces parois, il serait possible d'utiliser une assez grande partie de la chaleur perdue. Or, c'est ce que réalisent les tuyaux de poêle. L'air échauffé dans le foyer s'élève dans un cylindre de tôle mince et étroit, et par son contact avec le métal qui est beaucoup plus froid que lui, lui cède une partie de sa chaleur. Le métal échauffé rayonne dans la chambre, et l'on sait que c'est à ce rayonnement surtout que la chambre doit sa chaleur. L'échauffement dépend de la longueur du tuyau. Les pièces de tôle accessoires, telles que celles qui composent les fours de poêle, contribuent aussi à l'échauffement. Or, tout ce que les tuyaux et ces autres pièces fournissent de chaleur est entièrement perdu avec les cheminées ordinaires. Les portes du poêle et tout l'appareil lui-même contribuent aussi à l'échauffement.

Avantage des poêles.

Au point de vue économique, un poêle est donc incomparablement supérieur à une cheminée : il apporte dans la chambre une chaleur à la fois très-intense et très-uniforme, à beaucoup moindres frais que l'autre appareil. Il a l'inconvénient de vicier l'air en peu de temps, parce qu'il ne le renouvelle pas assez. On sait aussi qu'il produit généralement le mal de tête: cela vient de ce que chauffant avec rapidité l'air de l'appartement, qui n'est pas saturé de vapeur par sa nouvelle température, il développe une évaporation cutanée qui n'est pas soutenue par une transpiration égale; la peau se dessèche donc rapidement, et telle est la cause du malaise qu'on éprouve. On remédie à ce mal en plaçant sur le poêle une assiette plate remplie d'eau; comme ce liquide est assez vite échauffé, il produit rapidement la vapeur nécessaire à la saturation de l'air. On hâte cet effet, en versant de l'eau sur le tuyau.

Outre les cheminées dites *prussiennes*, il en existe qui jouent tout à fait le rôle d'un poêle. Le foyer se compose de plusieurs tuyaux horizontaux et juxtaposés; ces tuyaux, qui communiquent ensemble, prennent l'air dans le tuyau de cheminée auquel est appliqué l'appareil dont il s'agit, et cet air qui circule dans ces tubes s'y échauffe à proportion de l'activité du feu. Le dernier de ces tuyaux déverse par une bouche de chaleur placée au flanc de la cheminée l'air chaud qui a traversé tout le système, de sorte que non-seulement la chambre reçoit de l'air chaud en quantité

considérable, mais de plus l'entrée de cet air dans la chambre peut faire compensation à celui qui s'élève dans la cheminée, de telle sorte qu'on peut sans inconvénient rendre la chambre parfaitement close.

203. Occupons-nous maintenant des faits de conducibilité.

Conducibilités diverses.

Les divers corps conduisent la chaleur à des degrés très-différents. On le prouve en enduisant des barreaux égaux de tous les corps qu'on veut éprouver avec une couche de cire identique, et les plongeant de quantités égales dans une même source de chaleur. La cire fond en même temps sur chacun d'eux, mais selon des longueurs diverses, qu'on considère comme proportionnelles aux conducibilités de ces diverses substances pour la chaleur. Voici la valeur relative des conducibilités ainsi mesurées :

Or........	1000	Zinc......	363	Brique.....	11
Platine....	981	Étain.....	304	Bois et charbon, inférieurs, mais indéterminés.	
Argent....	973	Plomb.....	180		
Cuivre....	898	Marbre....	24		
Fer......	374	Porcelaine.	12		

On voit que les quatre premiers métaux l'emportent beaucoup sur les suivants, et l'on se rend raison par là de la supériorité des casseroles de cuivre sur celles de fer. De plus, le métal le moins conducteur l'est incomparablement plus que les autres substances, marbre, pierre, etc. Quant au charbon et au bois, ils le sont excessivement peu. Une cuiller d'argent plongée dans un liquide très-

chaud s'échauffe en très-peu de temps au point de ne pouvoir être tenue à la main; une cuiller de bois dans les mêmes circonstances ne laissera aucune impression à l'organe. Bien plus, un pareil ustensile étant plongé dans le feu, et brûlant à l'une de ses extrémités, l'autre bout ne changera pas de température.

Les substances organiques des deux règnes sont en général pourvues d'une très-faible conducibilité. La toile, le coton, la laine, le duvet, l'édredon, les poils des animaux, sont des conducteurs extrêmement imparfaits. Les liquides le sont encore davantage : quant à l'air et à tous les gaz, ils laissent sous ce rapport toutes les autres substances derrière eux.

204. On fait une expérience assez curieuse qui met en relief la grande conducibilité des métaux comparée à celle des substances organiques. Si l'on entoure de fil un morceau de métal, une grosse clef par exemple, on peut la jeter au feu, et l'y laisser quelque temps sans que le fil brûle. Une boîte de montre, une cuiller d'argent enveloppées d'un linge très-serré et ne formant pas de plis, peuvent aussi être exposées à la flamme d'une bougie pendant un temps assez considérable, sans que le tissu éprouve la moindre altération. C'est que la flamme donne la plus grande partie de sa chaleur au métal, qui, étant bon conducteur, l'éparpille rapidement dans toute sa masse, de sorte que sa surface reste assez longtemps froide, et qu'au contact de ce corps froid, la température

Préservation des corps combustibles.

de la flamme s'abaisse assez pour être incapable de dénaturer la substance végétale. Mais là où cette substance forme des plis, elle n'est plus en contact avec le métal, et n'est plus préservée par lui de l'action du feu.

Si l'on enveloppe une balle de plomb dans une feuille de papier serrée, et qu'on suspende cet ensemble au-dessus de la flamme d'une bougie, à distance convenable, la balle finira par s'échauffer jusqu'au point de fusion du métal, avant que le papier subisse la moindre altération. Le plomb fondu coulera en perçant le papier, mais celui-ci n'aura pas pris feu. La théorie de cette expérience curieuse est la même que dans le cas précédent; seulement on profite de la grande fusibilité du plomb.

On fait une expérience encore très-curieuse, analogue à celle-là en apparence, mais qui ne repose pas entièrement sur le même principe. On prend une carte dont on pince les coins et dont on relève les bords, de manière à former un petit plat, et dans celui-ci, l'on met une couche de sucre pulvérisé. Si l'on tient quelque temps ce petit plat au-dessus de la flamme d'une bougie, le sucre fond, et passe à l'état de caramel, sans que le papier brûle; à peine est-il légèrement charbonné à sa surface. Ceci tient à ce que la température nécessaire à la fusion du sucre, est notablement inférieure à celle qui produirait la décomposition du papier.

205. L'influence de la conducibilité métallique

sur la flamme dont elle abaisse la température, se manifeste dans l'emploi des toiles métalliques, des becs de gaz, etc.; c'est une des plus précieuses applications qu'on ait faites de la physique aux besoins de l'humanité.

Toiles métalliques.

Si l'on abaisse au-dessus de la flamme d'une bougie, une toile métallique composée de fils de cuivre ou de fer assez fins et assez serrés, non-seulement la flamme ne passera pas, mais elle sera écrasée par la toile, et si celle-ci continue à l'envahir, la flamme s'éteindra. Mais si la toile est fine et à larges mailles, la flamme finira par passer. Si les mailles sont étroites et que la toile reste fort longtemps en contact avec la flamme, la toile finira par rougir, et dès lors la flamme passera. Mais on peut prendre une toile telle qu'exposée à une flamme donnée, d'une certaine façon, elle ne laisse point passer celle-ci, ou du moins ne lui livre passage qu'après un temps fort considérable.

Si on laisse sortir un gaz inflammable par un ajutage métallique très-étroit, le gaz pourra s'enflammer à la sortie, mais la flamme ne pénétrera pas dans l'intérieur. Ce phénomène est de même nature que le précédent. Tous deux résultent de ce que la température de la flamme est absorbée en très-grande partie par le métal, et qu'il n'en reste pas assez pour que le gaz continue à être flamme. La combustion ne peut donc s'étendre au delà de l'obstacle. On conçoit que la masse du métal influe sur l'effet produit. Une toile fine sera rapide-

ment échauffée et pourra rougir; une toile suffisamment forte pourra ne conserver à sa surface qu'autant de chaleur que le rayonnement du métal en emporte. Les becs qui donnent issue au gaz contiennent trop de métal pour que la pointe inférieure du jet puisse les échauffer sensiblement.

On emploie les toiles métalliques dans une foule de cas. On en fait des rideaux pour les théâtres, mais rideaux qu'on n'abaisse qu'en cas d'incendie sur la scène. La toile sépare immédiatement celle-ci de la salle, et l'incendie se trouve tout d'un coup concentré.

On place des toiles métalliques très-serrées et très-nombreuses dans l'intérieur du conduit qui donne issue aux gaz condensés du chalumeau de Brooks. Comme la température de la flamme qui brûle au bout de ce chalumeau est véritablement excessive, on conçoit le cas où le métal du bec ne l'empêcherait pas de passer. Alors elle rencontrerait sur sa route un très-grand nombre de toiles métalliques qui lui interdiraient toute marche ultérieure et préviendraient l'explosion.

Les trous des becs de gaz qui sont percés dans une lampe de métal, sont assez petits pour produire l'effet voulu. On conçoit que si ces ouvertures étaient plus larges, la température de la flamme abaissée au contact des parois du trou, ne le serait pas en dedans de la petite colonne gazeuse qui passe, et pourrait par conséquent se propager dans l'intérieur des tuyaux. C'est à quoi l'on obvie,

en ne donnant aux divers jets de gaz qu'une issue capillaire. Mais lorsque les tuyaux sont déchirés par quelque accident, les fissures offrent à la flamme un assez large passage, et des explosions s'ensuivent.

Une des plus intéressantes applications qu'on ait faites de l'emploi des toiles métalliques, est celle des lampes de mineurs ou lampes de Davy.

206. Les mines de houille et plusieurs autres laissent souvent échapper des masses considérables de gaz hydrogène carboné, et une flamme introduite dans un mélange de ce gaz avec l'air, y détermine une inflammation subite; de là une explosion qui ébranle la mine, et cause la mort de beaucoup d'ouvriers. Pour prévenir ces désastres, Davy a imaginé d'enfermer la lampe du mineur dans une toile métallique qui la recouvre comme les verres ordinaires des lampes, seulement, elle est de plus fermée à la partie supérieure. Si l'ouvrier pénètre avec sa lampe dans un mélange détonnant, le gaz qui a pénétré dans l'intérieur de la toile, s'y enflamme au feu de la lampe avec une légère explosion; mais l'effet se concentre dans cette enveloppe que la flamme ne saurait traverser pour se propager à l'extérieur dans la masse gazeuse. Le mineur averti quitte la mine, qu'on débarrasse du gaz par une ventilation convenable. La lampe du mineur peut être conservée quelque temps avec sa flamme intérieure; il est plus sûr de ne pas tarder à l'éteindre, mais dans tous les cas le mineur est préservé de l'explosion. Malheu- **Lampe de Davy.**

reusement, il arrive que certains ouvriers ne s'en servent qu'avec répugnance, parce que la toile métallique nuit considérablement à l'effet de la lumière, et il est souvent arrivé que les mineurs enlevassent la toile; imprudence dont un assez grand nombre s'est déjà trouvé victime. On a amélioré les lampes sous ce rapport, en les pourvoyant de réflecteurs.

Hommes incombustibles. 207. On a employé les toiles métalliques à faire des hommes incombustibles. Des cottes de mailles formées d'annelets de cuivre, reliés par de la laine imbibée d'alun ou des fils d'amiante, des bottes et des casques également métalliques, forment aux pompiers un vêtement qui reste pendant plusieurs minutes imperméable à la flamme, et leur permet de marcher dans les feux les plus intenses. Toutefois, il ne faut pas oublier que si la flamme est arrêtée au passage, il n'en est pas de même de l'air chaud qui les entoure, et leur respiration est assez gênée pour qu'il ne leur soit guère possible de faire un long séjour dans le feu. Mais ils y peuvent rester assez pour rendre d'importants services. (*Voir n°* 217.)

208. Nous avons déjà signalé les becs qui donnent issue au gaz par un certain nombre de petits trous. Une flamme unique de la largeur du bec est rigoureusement impossible; on arrive au même résultat en la détaillant : les filets gazeux qui sortent par des trous capillaires font une somme de lumière équivalente à celle-là. Nous profiterons de l'occasion pour parler d'une nou-

velle sorte de lampe, qui a toutes sortes d'avantages sur les lampes à huile employées jusqu'à ce jour; c'est la lampe à *alcool térébenthiné*.

Lampe à vapeur d'alcool.

Qu'on imagine un simple vase rempli d'un mélange de cinq à six parties d'alcool contre une d'essence de térébenthine, et une mèche ordinaire plongeant dans ce liquide très-évaporable. Il se dégage au sommet de la mèche une certaine quantité de vapeur; or, cette vapeur a issue dans l'air par les petits trous d'une plaque semblable à celle des becs ordinaires de gaz. On enflamme cette vapeur, qui est très-combustible, au moyen d'un anneau garni qu'on plonge dans l'alcool et qu'on enflamme; placé autour du bec, il l'échauffe d'abord, ce qui provoque un plus grand développement de vapeur, et lorsque le bec et la plaque sont suffisamment échauffés, les jets de vapeur s'allument et brûlent comme les jets de gaz, qu'ils imitent parfaitement sous tous les rapports. Au milieu de la plaque percée s'élève un cylindre de cuivre qui simule la mèche d'une chandelle, mais dont le rôle consiste à se tenir constamment échauffé au milieu de la flamme qui le lèche, et à transmettre la chaleur à la plaque *mn;* celle-ci, échauffée par ce moyen, rayonne au-dessous d'elle dans l'espace V qui la sépare de la mèche, et cette chaleur détermine et maintient l'évaporation du liquide.

Cet éclairage est très-beau et d'une extrême simplicité; le liquide combustible n'a aucun des

inconvénients de l'huile, n'a point de mauvaise odeur, ne graisse point, ne tache point; la lumière est d'une constance remarquable; la mèche n'a besoin d'être renouvelée qu'à de très-longs intervalles. On emploie des becs percés de 3, 4, 5, 6 trous, selon la clarté qu'on veut avoir. Cette lampe offre tant d'avantages, qu'on ne concevrait plus l'emploi des lampes à huile, à dépense égale. Malheureusement, l'alcool térébenthiné coûte encore assez cher pour qu'on puisse discuter la question d'économie relative. Il faut observer aussi que la grande inflammabilité du liquide donne lieu à quelque danger dans le cas de renversement accidentel de la lampe, ou dans le maniement du vase qui sert à l'alimenter.

209. Dans ce qui précède, c'est la bonne conducibilité des corps qui est mise à profit; voici, au contraire, d'autres cas où l'on utilise leur inconducibilité.

Inconducibilité des corps mise à profit.

Veut-on conserver un liquide longtemps chaud, pour le transporter au loin par exemple. On l'enfermera dans un vase de fer-blanc à double enveloppe, et l'on garnira l'intervalle des deux feuilles métalliques avec de la sciure de bois, du charbon en poudre, ou de la laine. Ces substances étant de fort mauvais conducteurs, le liquide perdra fort peu de sa température dans un temps assez considérable. De plus, on aura le soin de tenir brillantes les surfaces métalliques.

Les poêles de fonte donnent et perdent rapidement leur chaleur; ceux de faïence, qui conduisent

beaucoup moins bien, gardent plus, et dispersent lentement la chaleur qu'ils reçoivent; ils chauffent donc plus doucement et plus constamment; ce qui vaut mieux en général.

210. Lorsqu'on veut connaître la température d'un lieu profond inaccessible, comme d'une source artésienne, du fond de la mer, au lieu de recourir à l'emploi d'un thermomètre à *maximum* ou à *minimum*, on peut prendre un thermomètre ordinaire qu'on enduit d'une couche mince de cire ou de résine. L'instrument ainsi habillé, il faudra le laisser un certain temps dans le milieu dont on veut prendre la température, parce que la très-imparfaite conducibilité de la couche qui le revêt, ne permet à la chaleur du milieu de pénétrer que lentement jusqu'au mercure. Mais lorsqu'on remonte le thermomètre, la même cause l'empêche d'être sensible aux températures variables qu'il traverse, et il arrive sous les yeux de l'observateur avec celle qu'il a prise dans le milieu où on l'avait établi. On conçoit qu'on puisse, au moyen d'expériences préalables, connaître quel temps il faut à la couche résineuse pour se laisser pénétrer.

211. La matière qui compose la partie la plus superficielle du sol, ce qu'on appelle plus particulièrement la *terre*, et dans quoi l'on peut comprendre les sables, est douée d'une très-faible conducibilité, qu'on met à profit dans différents cas, particulièrement pour conserver la chaleur des corps qu'on y enfouit. Une masse métallique con- Cuisson en terre.

sidérable et très-chaude qu'on enfermerait à deux mètres sous terre, conserverait pendant un temps très-long presque toute sa température. On connaît entre autres le procédé de cuisson employé par les insulaires de la mer du Sud. Dans un trou creusé en terre, on allume du feu et l'on y fait rougir des pierres plates. Lorsqu'on a un nombre suffisant de ces pierres, on en fait un lit sur lequel on dépose la viande à cuire dans une enveloppe de feuilles. Un autre lit de pierres chaudes est placé au-dessus, et le trou est ensuite comblé avec de la terre. Plusieurs heures après, on trouve la viande cuite à point, et cette viande jouit d'une saveur que ne sauraient donner nos procédés de cuisson. C'est un véritable four, où l'on fait rôtir des moutons et des cochons entiers : la chaleur est employée intégralement à cuire la viande, l'inconducibilité de la terre empêchant à peu près toute dispersion. Ce procédé est souvent décrit dans les relations de voyages ; nous croyons que notre civilisation ne ferait pas mal de l'emprunter aux Océaniens.

Conservation des températures internes.

212. C'est à la très-faible conducibilité des matières terreuses qu'est due la constance des températures intérieures sur chaque couche de la croûte du globe. A un mètre de profondeur, la température ne varie pas du jour à la nuit. Dans nos climats, la différence des températures extrêmes de l'été à l'hiver est fort peu sensible, à une profondeur de huit mètres ; elle n'a jamais dépassé un degré et demi, et l'on remarque que le maximum de cette température a lieu vers le mi-

lieu de décembre, ce qui montre que la propagation de la chaleur prend trois ou quatre mois pour traverser cette couche de 8 mètres de terre. Dans les régions équinoxiales, un thermomètre enfoncé en terre et à l'ombre à 33 centimètres de profondeur, marque la même température, à un ou deux dixièmes de degré près, pendant tout le cours de l'année. On prend ces températures souterraines au moyen de thermomètres à très-longues tiges saillantes sur le sol.

Dans notre climat, à 24 mètres au-dessous de la surface, la température reste invariable, même dans un air qui communique très-librement avec l'extérieur. Tel est le cas des caves de l'Observatoire de Paris, qui restent constamment à 10°,84. Mais il n'est pas douteux que la constance absolue de température n'existe dans des couches solides beaucoup plus rapprochées de nous.

213. La conservation de la chaleur dans les pièces artificiellement échauffées dépend en grande partie de la garniture de leurs parois. Le bois étant beaucoup moins conducteur que les substances pierreuses, une chambre sera beaucoup plus chaude qu'une autre si elle est boisée. Dans les contrées du Nord, on échauffe au moyen de grands poêles en brique qu'on allume le matin pendant deux heures, de grandes chambres dont l'enceinte est formée de poutres de bois de 3 décimètres d'équarrissage, dont les joints sont garnis d'étoupe et dont l'ensemble est recouvert de planches de 5 à 6 centimètres d'épaisseur. La chaleur de ces

Moyens divers de conserver la chaleur et la fraîcheur.

poêles s'y conserve admirablement bien, et pendant vingt-quatre heures, on y jouit d'une température de 15° à 16°. Tout le monde sait quelle différence d'effet se produit sur les pieds selon qu'ils se posent sur le parquet ou sur le carreau. La laine étant aussi un très-mauvais conducteur, les tapis préviendront la perte de chaleur soit de l'air, soit du corps humain. L'épaisseur des murs a peu d'influence, à cause de l'action refroidissante des vitrages, qui absorbe largement celle des murs. Les vitres en effet sont toujours à la température de l'extérieur, et l'air chaud de la chambre qui les lèche continuellement y perd la plus grande partie de sa chaleur. Si la surface en est considérable, il y a là une cause de refroidissement très-énergique. Nous allons dire plus bas comment on peut l'atténuer.

214. Disons encore que les mêmes moyens conservent la fraîcheur d'une chambre ou d'un local quelconque. Les glacières préservent la glace de la fusion, parce que l'enceinte en est formée dans la terre, et garnie de terre à l'extérieur; la chaleur du dehors n'y peut donc pénétrer qu'avec peine, et comme il en faut beaucoup pour fondre une certaine quantité de glace, on n'en perdra que peu dans un temps assez considérable. La glace qu'on transporte sur les vaisseaux est placée dans des caisses de bois entourée de tan et de paille. Il serait possible de conserver un bloc de glace pendant plusieurs mois d'été en le plaçant dans un vase à double enveloppe avec du charbon pilé

ou quelque chose d'analogue. Un vase tout à fait semblable conserverait un liquide chaud.

215. Les gaz, avons-nous dit, sont des conducteurs plus imparfaits encore que les plus mauvais parmi les solides et les liquides, et s'ils s'échauffent, ce n'est que par des courants. L'air peut donc servir d'enveloppe protectrice pour conserver la chaleur ou la fraîcheur. Une application remarquable de cette propriété se rencontre dans les doubles fenêtres de certaines maisons. Nous avons dit que les vitres refroidissaient considérablement l'air intérieur par leur contact. Or, si en deçà des vitres qui communiquent à l'extérieur, on établit une seconde fenêtre, il y aura entre les deux fenêtres une couche d'air qui ne transmettra que difficilement aux vitres intérieures la température des vitres extérieures; les premières resteront donc à peu près en équilibre avec l'air de la chambre, et la déperdition de chaleur sera très-faible. Les doubles portes produisent un effet analogue, outre l'avantage qu'elles ont de préserver des courants froids.

216. Il est à remarquer combien, malgré l'extrême mobilité de l'air, le mélange de deux airs s'effectue lentement entre deux chambres communicantes et dont l'une seulement contient du feu. C'est un phénomène analogue que la constance de température des caves, malgré leur communication avec l'air extérieur, et l'on a lieu de s'étonner au même titre, qu'une chambre échauffée qui communique par la cheminée avec l'air extérieur peut-être très-froid qui la surmonte

et que sa plus grande densité devrait faire tomber par le tuyau, conserve néanmoins une température très-différente et bien supérieure.

Action des vêtements.

C'est à ce genre d'inertie combiné avec l'inconducibilité propre des gaz qu'est due l'action des vêtements et de toutes les enveloppes, en tant qu'ils conservent parfaitement bien la chaleur. Assurément nos habits n'empêchent point l'air extérieur de pénétrer au-dessous, et cependant leur suppression dans l'hiver serait insupportable. Cela tient à ce que la couche d'air comprise entre eux et la peau, couche qui est échauffée par le rayonnement du corps, reste emprisonnée dans l'intérieur des vêtements, et que l'inconducibilité de la laine empêche la chaleur de se perdre à l'extérieur. A quoi il faut ajouter que l'enveloppe réfléchit partiellement la chaleur émise par la peau. La conservation de la chaleur sera d'autant plus efficace que la substance sera moins conductrice; sous ce rapport, le coton, et surtout la laine, l'emportent beaucoup sur les tissus de chanvre et de lin; de plus, l'épaisseur de l'enveloppe contribuera évidemment à l'effet. Toutes choses égales d'ailleurs, les surfaces blanches conduiront moins la chaleur que les surfaces obscures; elles seront donc avantageuses dans tous les cas. Car en prenant la température de 16°, par exemple, comme celle de l'air dans lequel nous n'éprouvons aucune impression désagréable de froid ou de chaud, au-dessus de 16°, la chaleur de l'air extérieur sera empêchée par la surface blanche de traverser nos vê-

tements et d'élever la température de notre milieu immédiat; au-dessous de 16°, elle empêchera l'air intérieur de se refroidir par conduction. En général, elle empêchera le mélange des températures, qui troublerait en plus ou en moins cet état d'équilibre caractérisé par la température à 16°. Ainsi les meilleurs vêtements sont, toutes choses égales d'ailleurs, des habits blancs de toile pendant l'été, et des habits de laine blanche pendant l'hiver.

L'édredon qui garnit nos lits, agit d'une manière analogue, et il en est de même des fourrures et des tricots : toutes ces matières fournissent une foule de petites loges, desquelles l'air échauffé ne se dégage que difficilement. On a donc une couche isolante qui préserve le corps du renouvellement de l'air. Enfin, je ferai remarquer, qu'au lieu des doubles fenêtres dont nous parlions tout à l'heure, on peut obtenir partiellement le même effet, en appliquant et fixant contre les fenêtres de simples rideaux de mousseline. Entre ce léger tissu et les vitres, il s'établit une couche d'air à peu près inerte, et c'est contre la mousseline que l'air de l'appartement va se frotter. La déperdition de chaleur diminue donc considérablement. Tout le monde sait qu'on préserve une plante de la gelée blanche, en tendant au-dessus d'elle un morceau de mousseline.

217. Nous terminerons ce chapitre par quelques mots sur les bois, les papiers, les étoffes et les hommes incombustibles.

Les bois, les papiers et autres substances ana-

logues, sont enduits d'une matière saline qui empêche l'accès de l'oxygène, et par conséquent son action. Cet effet étant purement chimique, nous renverrons, pour en parler, à la seconde partie de cet ouvrage.

Substances rendues incombustibles.

Il en est autrement des hommes incombustibles. Ceux qui touchent impunément des fers rouges, des métaux fondus, des charbons incandescents, ont la peau enduite de diverses substances très-peu conductrices. Le savon noir et l'alun font la plus grande partie des frais de ces préparations. Lorsqu'on applique sur elles les corps chauds, l'inconducibilité de l'enduit préserve d'abord la peau de l'action de la chaleur, et la décomposition subséquente, ou soit la liquéfaction, soit la vaporisation de la matière appliquée, absorbe et rend latente une grande quantité de calorique.

Quant aux incombustibles qui se placent dans un four avec le pain à cuire, il n'y a point d'explication physique de ce fait. Les hommes s'habituent à des excès en tout genre, par un exercice gradué et prolongé, et ceux dont il est ici question, se sont façonnés par de longs essais à supporter des températures croissantes. C'est ainsi qu'on voit des hommes avaler l'alcool à plein verre, c'est-à-dire, à des doses plus que suffisantes pour tuer sur-le-champ des personnes non exercées à ce genre d'exploits. Or, ils n'ont pas débuté par là assurément, et ils ont acquis, par des essais progressifs dont tout le monde n'est pas capable, il est vrai, cette prodigieuse et médiocrement honorable faculté.

CHAPITRE XVII.

DE LA CHALEUR LATENTE.

218. Si l'on met dans un kilogramme d'eau à 79°, un kilogramme de glace à 0°, suffisamment pilée, la glace fond tout entière, et l'on a 2 kilogrammes d'eau liquide à zéro. Ainsi, 79° de chaleur ont disparu, mais la glace est devenue eau liquide. Cette chaleur s'est combinée avec l'eau solide, mais sans changer sa température. C'est une chaleur combinée ou *latente*. Si, au lieu d'un kilogramme de glace à zéro, on prenait un kilogramme d'eau liquide aussi à 0°, le mélange formerait 2 kilogrammes à 39°,5. La chaleur n'a pas disparu, même partiellement; elle s'est seulement partagée entre les deux masses. Ainsi, il est bien évident que c'est la fusion qui absorbe le calorique. Chaleur latente. Sa mesure.

La vaporisation des liquides en fait autant; car la rapide évaporation de l'eau sous la machine pneumatique, même quand l'air ambiant est fort chaud, fait passer ce liquide à l'état de glace. De plus, il est possible de mesurer aussi la dose de chaleur rendue latente. Car si l'on fait rendre un kilogramme de vapeur d'eau à 100°, dans 5$^{kil.}$,4 d'eau à 0°, on obtient 6$^{kil.}$,4 d'eau à 100°. En se condensant, le kilogramme de vapeur forme

un kilogr. d'eau liquide à 100°; mais, de plus, 5$^{kil.}$,4 d'eau froide ont été chauffés à 100°; ce ne peut être que par une certaine quantité de chaleur latente que la vapeur aurait abandonnée en devenant liquide. C'est donc ce qu'elle a absorbé pour passer de l'état liquide à l'état de vapeur.

Ces principes sont la clef d'une foule de phénomènes très-dignes d'intérêt et d'expériences fort utiles.

219. On refroidit considérablement l'eau bouillante en y jetant un morceau de métal composé, dit *alliage fusible* de Darcet. Cet alliage fond à 90°, quoiqu'il ait une densité et un poids considérables; il a toutes les apparences du plomb et plus de dureté. Or, en fondant dans une cuillerée d'eau bouillante, il absorbe une quantité considérable de calorique qui est rendu latent, absorption qui doit refroidir considérablement l'eau dans laquelle il plonge. Il en résulte que sa température, après la fusion, ne dépassera pas 90°, et qu'avec toutes les apparences de plomb fondu, il ne sera pas tellement chaud qu'on ne puisse le manier; ce qui donne lieu à des tours de charlatan assez agréables. Une recette plus sûre encore consiste à opérer avec de l'amalgame de bismuth, qui fond à 52° et qu'on peut mettre dans la bouche. L'escamoteur affirme qu'il boit du plomb fondu.

220. Tout mélange d'eau liquide ou solide, avec une substance pour laquelle elle a une affinité chimique, produit du froid, surtout quand l'eau est à l'état solide.

Qu'on mêle ensemble trois parties de glace pilée et une de sel commun, la température du mélange descendra à 20° sous zéro. C'est le résultat de l'affinité réciproque du sel et de l'eau. Ces deux corps tendent à se combiner, ce qu'ils ne peuvent faire qu'à l'état liquide, cet état se produira donc; mais il ne peut le faire que par l'absorption d'une certaine quantité de calorique qui sera rendue latente. Froids artificiels.

C'est dans ce mélange, où le salpêtre peut remplacer le sel commun, que l'on plonge les *sorbetières* qui contiennent les jus de fruits sucrés dont on veut faire des *glaces*. Les vases sont en étain ou même en argent; ils sont cannelés, pour qu'une plus grande surface soit offerte au mélange; ils sont très-minces, pour que la communication des températures soit très-rapide; enfin, on les soumet à l'agitation, afin de briser sans cesse la légère croûte de glace qui se forme sur les parois intérieures, et d'amener tout le liquide en contact avec la surface refroidissante. Glaces.

221. Il y a quatre sortes de mélanges réfrigérants :

1° Les mélanges d'eau liquide et de sels; 2° les mélanges de glace et de sels; 3° les mélanges de glace et d'acides; 4° enfin, les mélanges de sels et d'acides. Il existe un très-grand nombre de formules pour ces diverses classes; nous n'en citerons qu'une dans chaque catégorie.

Il y a d'abord les dissolutions salines dans l'eau. Toute dissolution se fait avec abaissement de tem- Variétés de mélanges réfrigérants.

pérature; mais la perte peut être si faible, qu'elle soit immédiatement balancée par la chaleur que restitue l'air ambiant. C'est pour cela que le sucre, par exemple, ne produit aucun effet sensible. Mais les sels, en général, refroidissent l'eau sensiblement; le chlorure de calcium produit un effet notable; mais la dissolution qui donne le résultat le plus frappant, est celle du nitrate d'ammoniaque : une poignée de ce sel dans un verre d'eau, fait descendre rapidement le thermomètre de + 10° à — 15°.

Les mélanges réfrigérants de glace et de sels ont pour type celui que nous avons décrit plus haut; par son moyen, le thermomètre descend à —20°. On le ferait descendre encore plus bas, en y jetant une poignée de chlorure de calcium.

La glace et l'acide sulfurique, dans le rapport de 4 à 1, donnent un mélange liquide qui descend à—15°. Si l'on faisait le mélange dans un rapport inverse, il y aurait échauffement jusqu'à la température de l'eau bouillante.

Enfin, le système des acides et des sels est représenté par celui de 3 parties d'acide sulfurique étendu, et de 4 de sulfate de soude cristallisé; on obtient facilement avec celui-ci jusqu'à 8° sous zéro.

222. Mais après avoir refroidi certains mélanges, on peut les placer dans d'autres mélanges qui abaissent encore la température, parce que ces corps mêlés ont encore une action chimique réciproque dans les très-bas degrés du thermomètre. On com-

prend d'ailleurs qu'on ne les fasse agir que comme corps de réserve, pour ne pas user leur action à produire le premier froid, ce que d'autres peuvent faire. Ainsi, après que la glace et le sel commun ont produit un abaissement de température à — 20°, on rafraîchit séparément dans ce mélange 2 parties de glace pilée fin, et 3 de chlorure de calcium cristallisé; ces deux ingrédients étant mêlés ensuite, produisent, en se fondant mutuellement, jusqu'à — 55°. Enfin, on formera de la même manière un mélange de 4 parties de neige et 5 d'acide sulfurique étendu, contenant un cinquième d'alcool et deux cinquièmes d'eau; ce dernier mélange descendra de — 55° à — 68°.

Pour obtenir les résultats indiqués, il est nécessaire de se placer dans les meilleures conditions possibles : les sels doivent être pilés très-fin, et l'on prendrait, au lieu de glace, de la neige non tassée, pour que la combinaison s'effectuât le plus rapidement possible. Il est nécessaire, de plus, d'opérer dans un lieu frais et sur de grandes masses, afin que le contact de l'air et des vases ne puisse exercer qu'une très-petite influence et n'occasionner qu'un faible déchet. Il n'est pas nécessaire d'ailleurs que le sel soit pris à zéro : en plein été et sans jamais avoir rafraîchi préalablement le sel, nous obtenons constamment — 20° avec le mélange des glaciers.

Nous mettons ici en tableau les conditions de mélange et les résultats auxquels on parvient dans les cas que nous avons choisis :

N.	Substances mélangées.	Proportion.	Abaissement du thermomètre.
1.	Eau	1	de + 10° à — 15°
	Nitrate d'ammoniaque	1	
2.	Glace	3	de + 10° à — 20°
	Sel marin	1	
3.	Glace	4	de + 10° à — 15°
	Acide sulfurique	1	
4.	Acide sulfurique à 41°	3	de + 10° à — 8°
	Sulfate de soude cristallisé	4	
5.	Glace, neige	2	de — 20° à — 55°
	Chlorure de calcium cristallisé	3	
6.	Neige	4	de — 55° à — 68°
	Acide sulfurique alcoolisé	5	

Nous avons dit qu'il existait beaucoup d'autres formules; mais, outre qu'elles sont moins sûres que celles-ci, la multiplicité n'offre aucun avantage réel, quand les éléments de celles que nous donnons sont les plus usuels et les plus simples.

Le n° 5 est la préparation dont on se sert pour congeler le mercure; il suffit pour cela de — 40°. Ce métal solidifié offre les apparences d'un lingot d'argent; il est malléable, et l'on en fait des médailles; mais ces préparations sont, comme on le pense bien, dépourvues de stabilité. Une particularité remarquable qu'offre le mercure gelé, consiste en ce que son contact sur la peau y produit l'effet d'une brûlure. Nous verrons plus bas d'autres moyens de congeler ce métal.

Les procédés 1 et 4 fournissent le moyen de fabriquer de la glace sans glace; mais le premier des deux ne serait rien moins qu'économique. Quant au second, bien qu'il n'abaisse la température qu'à — 8°, il est véritablement utile, et, dans

certains cas, économique pour la production de la glace, même en grand.

223. Dans le mélange d'acide sulfurique étendu et de sulfate de soude, on plante des tubes larges et minces remplis d'eau; cette eau ne tarde pas à se geler, et en trempant quelques instants les tubes dans l'eau chaude, on en tire un certain nombre de cylindres de glace. Ou bien, on met dans le mélange réfrigérant un ou plusieurs vases métalliques à minces parois, *aplatis* et pleins d'eau; le liquide se gèle en assez peu de temps, et on le fait sortir de ses enveloppes par le moyen ci-dessus. Or, quand le mélange a perdu sa fraîcheur, il n'est pas pour cela perdu lui-même pour cette fabrication. En y versant de la soude, on change l'acide sulfurique en sulfate, et l'on a une masse de sel plus considérable qui servira pour une autre opération. Il n'y a donc de consommé en apparence que de l'acide sulfurique et de la soude, qui sont des substances à bon marché; mais le produit qui en résulte forme une masse de sulfate qui peut trouver un emploi utile de mille manières. Il n'y a donc pas de perte réelle; et l'on conçoit que lorsque la glace naturelle est chère, la fabrication dont il s'agit puisse être une précieuse ressource.

Congélation de l'eau par les mélanges.

Il est important d'observer que, pour qu'on puisse faire de la glace dans les mélanges réfrigérants, il faut que l'eau à geler soit un volume relativement petit, eu égard à la quantité du mélange. Car, ainsi que la glace qui fond, un mélange réfrigérant rend latente, par la fusion, une quan-

tité de chaleur qui est limitée ; or, avec une masse d'eau considérable, le mélange pourrait prendre à cette eau assez de chaleur pour se liquéfier, et la laisser encore au-dessus de zéro.

Refroidissement par évaporation. 224. L'évaporation refroidit, parce que la vapeur est de l'eau liquide combinée avec une certaine dose de chaleur latente. Ce principe rend raison de tous les faits que voici :

En arrosant d'eau le parquet d'une chambre pendant l'été, on entretient la fraîcheur dans cette chambre. C'est l'air qui cède à l'eau la chaleur nécessaire pour sa vaporisation.

Une bouteille d'eau entourée d'un linge qu'on a préalablement mouillé, se rafraîchit, même au soleil. L'évaporation prend à l'eau du calorique qui est rendu latent.

On fait rafraîchir l'eau dans des *alcarazas*, sortes de vases de terre non vernis, à travers lesquels l'eau suinte pour s'évaporer à leur surface. Ceci revient au cas précédent.

Quelques gouttes d'éther, d'eau de Cologne, d'alcool, versées sur la main, ne tardent pas à y produire une très-vive impression de froid ; on chasse, pour un instant, le mal de tête en en versant quelques gouttes sur le front. La fraîcheur que l'on éprouve en sortant d'un bain, même froid, se rapporte à la même cause, savoir l'évaporation de la légère couche de liquide qui reste adhérente à la peau.

225. On se sert de l'évaporation de l'éther pour fabriquer de la glace en quelques instants. Cette

expérience est une des plus intéressantes de la physique, et elle a son côté utile.

Pour cela, on remplit d'eau aux trois quarts un tube de verre, qu'on bouche et qu'on entoure de coton; puis, sur cette enveloppe, on verse de l'éther, ou plutôt l'on trempe le tube dans un verre rempli de ce liquide. On expose ensuite le tube à l'air, en le balançant ou en le faisant tourner; l'évaporation se produit aux dépens de la chaleur du tube et de l'eau, et en cinq minutes, cette eau s'est changée en un cylindre de glace. Il est bon d'attacher le tube à un thermomètre, dont la boule est garnie comme le tube, et comme lui mouillée d'éther; l'indication thermométrique fait connaître la température produite par l'évaporation, et l'on reconnaît à quel moment il est opportun d'ouvrir le tube pour en chasser le petit cylindre de glace. Le balancement et la rotation de l'appareil ont pour but le renouvellement de l'air qui favorise l'évaporation. Congélation de l'eau par l'éther.

226. On fait aussi en été, et dans un temps assez court, de la glace sous le récipient de la machine pneumatique. Pour cela, on y place un large bassin plein d'acide sulfurique concentré, au-dessus duquel est suspendue une capsule contenant une mince couche d'eau. Lorsqu'on fait le vide, l'eau s'évapore et sature instantanément de vapeur tout l'espace. Si cette vapeur restait dans le récipient, l'évaporation s'arrêterait; mais comme elle est absorbée en partie par l'acide sulfurique, en partie enlevée par le piston, le récipient demeure tou- Congélation de l'eau par la machine pneumatique.

jours vide de vapeur, ce qui amène une évaporation nouvelle; donc, l'eau se vaporise d'une manière continue et rapide. Il en résulte un abaissement très-considérable de la température de l'eau, et par suite la congélation de la couche supérieure.

Congélation de l'eau à l'air libre.

227. On peut produire aussi de la glace en été par l'exposition de l'eau à l'air libre; mais il faut pour cela que l'on ait un ciel d'une grande pureté. On dispose, sur des couches de roseaux, de larges baquets contenant des couches d'eau peu profondes; la surface se refroidit pendant la nuit par un rayonnement sans obstacle, et la température s'abaisse assez pour congeler l'eau. Ce procédé réussit parfaitement au Bengale; mais les essais qui ont été faits pendant quelques temps à Saint-Ouen, près de Paris, donnaient trop peu de glace pour compenser les frais de la fabrication.

228. L'éther est, de tous les liquides, celui dont l'emploi est le plus commode pour la production d'un froid intense; mais il n'est pas le seul, ni même à beaucoup près le plus énergique. On ne pourrait, par son moyen, congeler le mercure. Or, il y a trois substances par l'évaporation desquelles on peut produire cette congélation.

Congélation du mercure par le sulfure de carbure.

La première est le carbure de soufre, dont on imbibe le coton qui revêt la boule d'un thermomètre. En agitant ensuite l'appareil dans l'air pendant quelques instants, on gèle le mercure. Cela tient à l'extrême volatilité du carbure de soufre; mais ce procédé est désagréable à cause

de la très-mauvaise odeur du liquide employé.

On fait usage, en second lieu, de l'acide sulfureux liquide et anhydre. Dans l'état ordinaire, l'acide sulfureux est un gaz qu'on liquéfie par la pression de 2 ou 3 atmosphères. On le maintient en cet état dans un tube à pointe fermé à la lampe; on brise cette pointe lorsqu'on veut employer le liquide. Si on le verse sur un tube contenant du mercure, celui-ci se gèle en quelques instants par l'évaporation de l'acide, qui se fait avec une rapidité extrême et une odeur de soufre brûlé très-énergique, contre laquelle il est bon de se tenir en garde; dans cette opération, la température s'abaisse à — 57°.

Congélation du mercure par l'acide sulfureux.

229. On emploie également l'acide sulfureux liquide à faire de la glace. Si on en verse une certaine quantité dans un verre d'eau, l'acide se forme en boules dans le fond du vase, et si l'on agite ces petites sphères avec un tube, elles passent rapidement en vapeur, et congèlent l'eau en masse à leur sortie. L'opération est accompagnée d'un sifflement très-énergique. Ce moyen de faire de la glace n'est rien moins qu'avantageux sous le rapport de l'économie, l'acide sulfureux étant fort cher : un kilogramme de glace coûterait probablement 50 francs.

230. Un troisième moyen de congeler le mercure, et le plus énergique de tous, consiste dans l'emploi de l'acide carbonique liquide. Pour réduire l'acide carbonique à cet état, il faut le soumettre à une pression d'au moins 36 atmosphères;

Congélation par l'acide carbonique liquide.

car telle est la tension de sa vapeur à zéro. Voici en quoi consiste sa préparation.

On enferme, dans un vase de fonte d'une très-grande résistance, une certaine quantité de bicarbonate de soude et d'acide sulfurique. L'action de l'acide décompose immédiatement le sel, et les doses sont calculées de telle sorte, que le volume de gaz produit doive être égal à 40 fois au moins la capacité du vase. Il est clair que celui-ci étant solidement fermé, le gaz qui n'a pas d'issue se condense sur lui-même, et lorsque 36 litres de ce gaz se sont formés dans un litre d'espace, c'est comme si ce gaz était comprimé par une pression de 36 atmosphères. Dans cet état de compression il se liquéfie, et sa vapeur le surmonte avec une tension de 36. On le distille en le faisant passer dans un autre vase, semblable au premier.

L'acide carbonique liquide est limpide, d'une densité égale à 0,83, se dilate par la chaleur beaucoup plus que les gaz eux-mêmes. Sa vapeur, en passant de 0° à 30°, augmente de tension dans le rapport de 36 à 73 atmosphères. Ce liquide est insoluble dans l'eau, mais remarquablement soluble dans l'éther sulfurique.

Si l'on ouvre le robinet du vase en fonte contenant l'acide liquéfié, sa vapeur se précipite au dehors avec violence et subit une expansion énorme, dont l'effet est de la refroidir. Si alors on lui présente une surface métallique concave, telle qu'une sorte de timbale d'argent, elle passe à l'état solide, comme la vapeur d'eau à l'état de

neige, et il se forme des flocons blanchâtres d'acide solide, qui s'évaporent lentement entre les doigts. Si le jet de vapeur est dirigé sur la boule d'un thermomètre à alcool, celui-ci descend à — 90°.

Avec l'acide liquide livré à sa propre évaporation, on peut à peine congeler quelques petits globules de mercure; mais si l'acide est mélangé avec de l'éther, le mercure versé dans ce mélange se congèle en masses considérables après deux ou trois minutes. Un jet de ce mélange liquide produit sur la main une sensation de froid intolérable; avec l'acide pur, l'effet est beaucoup moins énergique, et quand l'acide solidifié s'évapore entre les doigts, il donne une impression encore plus faible. Cela prouve que l'acide pur en se vaporisant, et tout en abaissant la température beaucoup plus que ne le fait le mélange d'acide et d'éther, absorbe néanmoins et rend latente une quantité absolue de chaleur moins considérable.

Le mercure gelé par le mélange d'éther et d'acide, conserve quelque temps cet état; on peut le battre, le marteler, le casser, le mouler en médaille. Son contact produit sur la peau une sensation analogue à une brûlure, comme nous l'avons déjà dit.

La production de l'acide carbonique liquide peut donner une idée de la manière dont on liquéfierait d'autres gaz : la pression produite sous cette forme ou par une action directe, est souvent combinée avec un abaissement de température. Mais l'emploi de ces corps, et celui de l'acide carbonique en particulier, donnent lieu à des dangers

redoutables. On se rappellera longtemps l'horrible accident que la préparation de ce gaz a occasionné à l'école de pharmacie, en 1841. Malgré l'extrême solidité de l'appareil de fonte, ce récipient fit explosion; un jeune préparateur, lancé au loin, eut les jambes brisées et mourut le lendemain. Depuis cette époque, on a renoncé à faire, dans les cours publics, les curieuses expériences auxquelles cet acide donne lieu.

Dégagement de chaleur latente par la liquéfaction.

231. La vapeur d'eau, en se formant, rend latente une très-grande quantité de chaleur, qu'en se liquéfiant elle restitue à l'eau dans laquelle elle se condense. On sait que cette chaleur dégagée suffit pour élever à 100° un poids d'eau cinq fois et demie aussi considérable que celui de la vapeur condensée. En prenant pour unité de chaleur celle qui élève un kilogramme d'eau à un degré du thermomètre, un kilogramme d'eau vapeur à 100°, contient 100 unités de chaleur libre et 540 unités environ de chaleur latente. Ce sont ces 540 unités qu'on met à profit dans certains cas.

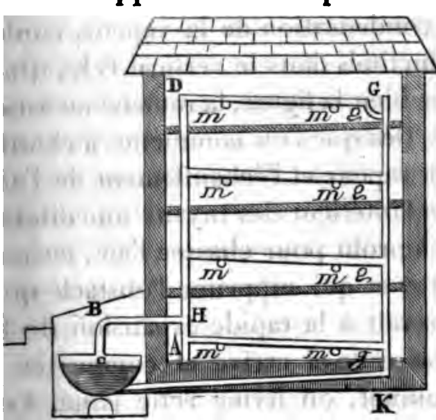
D'abord, on peut, au moyen d'une chaudière unique, échauffer à volonté l'eau contenue dans un nombre quelconque de récipients; et c'est ce qu'on pratique dans les teintureries et les buanderies. De la chaudière partent des tuyaux qui se rendent dans les divers cuviers; la vapeur se condense dans l'eau qu'ils contiennent, et leur température s'élève dans une progression qu'on peut régler facilement. Ce procédé a d'immenses avantages. Il simplifie les appareils, puisqu'il suffit

d'une chaudière et d'un feu unique; il apporte une très-grande économie, puisqu'on n'emploie pas le combustible qui, si l'on faisait autant de feux qu'on a de cuves, donnerait toute cette chaleur qui se perd par le rayonnement et d'autres causes; de plus, il permet d'employer des vases de bois, tandis qu'un chauffage direct nécessiterait l'emploi de vases de métal; enfin, toute la vapeur produite est utilisée, tandis que dans un chauffage direct une partie du liquide se perd par l'évaporation, ce qui refroidit d'ailleurs le reste. Ajoutons à cela que le chauffage de l'eau des cuviers peut être réglé avec la plus extrême précision.

232. La chaleur latente de la vapeur peut être utilisée encore dans un but de chauffage de salles et de maisons, qui a acquis de nos jours un certain développement. Nous allons décrire un *calorifère à vapeur.*

Calorifère à vapeur.

Cet appareil se compose d'une chaudière C où s'engendre la vapeur, et qui est ordinairement placée dans une cave, et d'un système de tuyaux de conduite, dont deux sont verticaux et les autres horizontaux. Dans le



premier tuyau vertical HD débouche un tube CBH qui amène immédiatement la vapeur de la chaudière; dans le tuyau HD s'embouchent les tuyaux horizontaux qui sont légèrement inclinés. Du tuyau HD la vapeur passe dans les tuyaux horizontaux, où elle se condense au contact de leurs parois, tant que ceux-ci ne sont pas à sa température; la chaleur latente dégagée par la liquéfaction échauffe ces tuyaux, qui, par le rayonnement de leur surface extérieure, en renvoient une partie dans les chambres. Les tuyaux sont en fonte et d'un diamètre de 12 à 15 centimètres. Les tubes verticaux sont à emboîtements compensateurs qui leur permettent de s'allonger et de se raccourcir sans se disjoindre par les changements de température. Les tubes horizontaux qui s'abouchent dans le premier vertical HD, débouchent dans le second GK par de petits tuyaux courbes de plomb, qui leur permettent de s'allonger et de se raccourcir, en glissant sur les rouleaux *m, m*. L'eau résultant de la condensation de la vapeur, coule par ces tuyaux inclinés dans le vertical GK, qui, comme l'indique bien la figure, la ramène au fond de la chaudière. Dès que l'on commence à chauffer, la première vapeur et l'échauffement de l'air produisent dans l'intérieur des tuyaux une dilatation qu'on met à profit pour chasser l'air, en ouvrant le robinet *r;* ce qui supprime l'obstacle que ce fluide opposerait à la rapide expansion de la vapeur; dès que celle-ci arrive et commence à sortir par le robinet, on ferme cette issue. Les

tuyaux sont donc toujours pleins de vapeur qui les chauffe en se condensant; l'air extérieur qui les lèche continuellement s'échauffe, et par des bouches de chaleur, se répand dans les pièces qu'il s'agit de chauffer. Les tuyaux sont toujours à 100° environ; mais l'air, en se renouvelant sans cesse, ne peut prendre qu'une partie de cette température. On a constaté que lorsque l'air est arrivé à 15°, il se liquéfie moyennement 1 kilog. de vapeur par mètre carré de surface de chauffe pendant une heure de chauffage; or, un kilogramme de vapeur donne 540 unités, qui pourraient porter de 0° à 15° 370 mètres cubes d'air. Mais à cause des pertes dues tant à l'absorption par les murailles qu'à la ventilation indispensable des chambres, on ne compte guère que sur le tiers de cet effet, et c'est sur cette base qu'on calcule d'avance l'étendue à donner aux calorifères.

On peut échauffer très-facilement et très-régulièrement par ce système, non-seulement de grandes pièces, comme des théâtres, comme la salle de la Bourse, comme le lieu de grandes réunions, mais des maisons tout entières, dont chaque étage a ses tuyaux de chauffe; un seul foyer suffit pour tout cela, et sauf les frais considérables d'établissement, l'échauffement par les calorifères à vapeur est très-économique. Il est sous ce rapport également préférable aux poêles ou calorifères à air chaud, dont il est impossible d'ailleurs de régler convenablement les effets. Quant à la fumée, il n'en saurait être question; mais il n'est

malheureusement pas facile d'appliquer ce mode de chauffage en petit, à chaque appartement, quand ces appartements forment des habitations isolées.

CHAPITRE XVIII.

CHALEURS SPÉCIFIQUES. HYGROMÉTRIE.

Chaleur spécifique en général.

233. Il faut des quantités de chaleur très-inégales pour élever d'un même nombre de degrés la température des différents corps. On prouve ce principe par différentes méthodes d'expérience, et l'on est parvenu à représenter les chaleurs spécifiques des corps, comparés à l'eau, par des nombres dont nous donnons ici quelques-uns. Cette table suppose que les expériences sont faites entre les limites 0° et 100°, car les chaleurs spécifiques varient avec la température. Du reste, il s'agit de poids égaux, et non de volumes égaux.

TABLE DES POIDS SPÉCIFIQUES.

Eau	1,000	Silice	0,179
Alcool (d. 0,793)	0,622	Verre	0,177
Éther sulfurique	0,520	Fer	0,109
Bois, moyennement	0,500	Cuivre	0,095
Essence de térébenthine	0,472	Zinc	0,093
Acide sulfurique	0,330	Arsenic	0,081
Huile d'olive	0,310	Argent	0,056
Salpêtre	0,269	Étain	0,051
Carbone	0,257	Mercure	0,033
Sel marin	0,220	Platine	0,031
Carbonate de chaux	0,200	Or	0,030
Chaux vive	0,179	Plomb	0,029

234. Les principes des chaleurs spécifiques et les chiffres de cette table permettent de résoudre un certain nombre de questions utiles.

La plus simple de toutes serait de la nature de celle-ci : on veut avoir un bain à 35°, et l'on a déjà versé 4 voies d'eau ou 192 litres qui ont une température de 37°,5. On demande combien il faut ajouter d'eau froide pour obtenir 35°.

Chaleurs écifiques mélanges. Supposons l'eau froide à 14°. Cette eau devra s'élever à 35° ou gagner 21 unités de chaleur par kilogramme, tandis que 192 litres ou kilogrammes d'eau chaude devant perdre chacun 1°,5... estions diverses. perdront en somme $192 \times 1{,}5 = 288$ unités. Soit x le nombre de kilogr. ou litres d'eau froide; on aura évidemment l'égalité... $21x = 288$... $x = \frac{288}{21} = 13{,}5$... environ 13 litres et demi d'eau froide. Il est facile de reconnaître qu'il n'y a en général à faire qu'une multiplication et une division, et la question est trop facile à mettre en formule pour que nous devions nous y arrêter.

On proposera cette seconde question : Quelle température prendra un litre d'eau à 86°, si on le verse dans un vase de cuivre pesant 350 grammes ?

Soit x la commune température que prendront l'eau et le vase. Celui-ci pesant $0^k{,}35$... recevrait, s'il était de l'eau, un nombre d'unités de chaleur $= 0{,}35\,x$. Mais sa chaleur spécifique est 0,095... il prendra donc moins dans le rapport $1 : 0{,}095$ pour s'élever à x degrés ; son acquisition sera par conséquent $0{,}35 . 0{,}095 . x$. Quant à l'eau, elle perdra

$86°—x$ par kilogr., et comme nous en avons un kilogramme, elle perdra juste $86°—x$ unités. Or, le gain et la perte doivent se compenser exactement, puisque le cuivre ne gagne que ce que l'eau perd; on aura donc l'équation :

$$0{,}35.0{,}095x = 86 - x \ldots$$

d'où... $x = \frac{86}{1{,}03325} = 83°{,}2$... L'eau ne perdra donc pas tout à fait 3 degrés.

Soit proposée cette troisième question : Étant donnée une masse d'eau à T, on veut l'abaisser à T' en y jetant de la grenaille de plomb à t. Quelle quantité de métal doit-on y jeter?

Soit m la masse de l'eau à t, x celle du plomb, la masse d'eau m perdra un nombre d'unités de chaleur évidemment égal à $m\,(T—T')$; le plomb gagnera $(T'—t).0{,}029.x$... le nombre 0,029 étant la chaleur spécifique du métal. On en tirera $0{,}029.(T'—t)\,x = m(T—T')$... d'où $x = \frac{m.(T-T')}{0{,}029.(T'-t)}$.

235. Lorsque l'on plonge un thermomètre dans un liquide pour avoir la température de celui-ci, le thermomètre enlève quelque chose, et la température lue n'est que la primitive diminuée par le contact du thermomètre. Quand la masse de celui-ci a par rapport à celle du liquide une valeur qui n'est pas à négliger, il faut de la lecture actuelle déduire sa température primitive qu'on n'a pas lue. Pour cela, soient m, n les poids respectifs du mercure et du verre rapportés au kilogramme, M celui de l'eau, x la température inconnue, T la température indiquée par le thermomètre; $M\,(x—T)$ représente la perte de chaleur que l'eau a subie.

Le thermomètre a gagné $(0,033m+0,177v)(T-t)$, t représentant sa température avant l'immersion. On aura donc l'égalité :

$$M(x-T)=(0,033m+0,177v)(T-t)\ldots$$

d'où... $x=\frac{(0,033m+0,177v)(T-t)+MT}{M}$... Telle sera la valeur demandée pour la température primitive.

236. Enfin, on peut mesurer par un calcul de ce genre les très-hautes températures, avec une approximation assez grande. Soit un petit boulet de fer porté au rouge blanc. On le placera rapidement dans une boîte de tôle, qu'on fermera hermétiquement, et qu'on plongera dans un vase plein d'eau. La masse et la température de l'eau et de l'enveloppe de tôle sont connues. Le boulet se refroidira en échauffant son enveloppe, et celle-ci transmettra à l'eau le calorique dégagé. Par l'élévation de température de l'eau lorsque l'équilibre sera établi, on pourra calculer l'abaissement qu'aura subi celle de la masse de fer intérieure. Il importe dans cette expérience de hâter le moment de l'équilibre, pour éviter les déperditions par le rayonnement; c'est à quoi l'on parviendra en prenant une masse d'eau relativement très-considérable et aussi froide que possible, et en mettant le petit boulet en contact immédiat avec elle aussitôt qu'on pourra le faire sans amener l'évaporation.

Soient M, m, b, les poids respectifs de l'eau, de l'enveloppe de tôle, et du boulet de fer, T' la température primitive de l'eau, t celle de la tôle, x celle du fer, la chaleur spécifique des deux mé-

[redacted]

taux étant supposée 0,15... enfin, soit θ la température commune acquise, on aura pour la perte du boulet... $0,15\, b\, (x-\theta)$... et pour les gains faits par l'eau et la tôle.... $M\, (\theta-T)+0,15 m(\theta-t)$; d'où $0,15\, b\, (x-\theta)=M\, (\theta-T)+0,15 m(\theta-t)$... d'où

$$x=\frac{M(\theta-T)+0,15\, m\,(\theta-t)+0,15\, b\, \theta}{0,15\, b}.$$

Il faut remarquer seulement que dans le poids M est compris l'*équivalent en eau* du vase qui contient l'eau, et que le coefficient 0,15 n'offre aucune garantie de complète exactitude.

237. L'hygrométrie proprement dite offre des expériences intéressantes, mais non des applications pratiques qui le soient au même degré. On peut désirer connaître quelle quantité absolue de vapeur d'eau est contenue dans un espace donné. On a pour répondre à cette question, outre les indications de l'hygromètre, qui exigent pour être comprises des tables et des calculs; on a, dis-je, les divers moyens de condensation de la vapeur, et les pesées après cette condensation. Placez sous un récipient de l'acide sulfurique, du chlorure de calcium en poids connu, ou un petit vase contenant quelque mélange réfrigérant. Ces corps absorberont ou précipiteront la vapeur répandue dans l'espace que le récipient recouvre, et par leur augmentation de poids en feront connaître la quantité.

238. On sait que certaines localités sont dites humides, parce que toutes leurs surfaces sont continuellement moites; que les corps qui y sont pla- Ce que c'est que l'humidité.

cés participent à cette moiteur, et qu'on y éprouve une impression de fraîcheur qui contraste avec ce qu'on ressent au dehors. Cela tient à ce que dans ces localités, qui sont toujours au contact du sol, la matière qui forme les parois agit par capillarité sur l'eau du sol et s'en impreigne; de là la moiteur de la surface; or, comme à la température médiocre qui règne en ces lieux, l'air est à peu près saturé de vapeur, quoiqu'il n'en contienne pas une quantité considérable, l'évaporation de l'eau ne saurait avoir lieu. Si le renouvellement de l'air s'y opérait, à de l'air presque saturé succéderait de l'air plus sec, qui pourrait absorber une nouvelle quantité de vapeur. Les murs et tous les objets qu'ils renferment céderaient une partie de la couche humide qui les recouvre, la peau en ferait autant, et toutes les impressions seraient modifiées.

239. Dans les lieux dits humides, les murs, surtout dans leur partie inférieure, sont toujours plus ou moins détériorés, et cette altération offre plusieurs sortes d'inconvénients. Elle provient de ce que le plâtre ou le ciment des parties basses boit l'humidité du sol; cette eau, en imprégnant le plâtre, le fait gonfler souvent outre mesure, et brise la surface des enduits. Quand les matériaux du mur contiennent du salpêtre, l'effet est alors très-prononcé, à cause de la grande déliquescence de ce sel.

Moyens divers de combattre l'humidité.

Les remèdes à cette altération sont de trois sortes.

On peut revêtir le pied des murs d'une couche de quelque substance imperméable à l'eau, de bitume, de mastic hydrofuge, dont beaucoup de variétés ont été proposées. Nous croyons que le bitume appliqué avec intelligence serait le meilleur de ces enduits.

La seconde méthode consiste à appliquer contre les murs, dans toute l'étendue de la surface altérable, des feuilles de métal minces, comme de plomb, de zinc et même de cuivre. Elles sont clouées les unes sur les autres, bord à bord, et appliquées solidement à la muraille, puis peintes comme le reste de l'appartement. Les altérations que peut subir la surface du mur sont étouffées sous cette cuirasse, et aucune ne se produit à l'extérieur. Ce système a encore, outre le mérite de la simplicité, celui d'une certaine économie, en ce sens que les feuilles métalliques ne sont pas un capital perdu, et peuvent se transporter partout ailleurs.

Un troisième moyen consiste à faire des murs artificiels au moyen de dalles minces qu'on applique à quelques millimètres en avant du véritable mur. Il en résulte un courant d'air qui balaye une partie de l'humidité provenant du sol; et comme d'ailleurs ces dalles ne sont ni déliquescentes ni spongieuses, les effets précités ne se produisent plus à l'intérieur.

240. Nous rapporterons à ce genre de phénomènes l'humidité absorbée par les chaussures, et à laquelle on oppose divers moyens qui revien-

nent tous à boucher les pores des tuyaux capillaires. On garnit le cuir de certaines substances imperméables, ou on lui substitue d'autres substances sur lesquelles l'eau est tout à fait sans action, le caoutchouc, par exemple. C'est par un semblable motif que l'on goudronne les câbles des navires.

Moyens de la produire.

241. Mais si l'on essaye généralement de repousser l'humidité qui pénètre la surface des corps, dans d'autres cas, au contraire, on l'appelle comme une action bienfaisante, et l'on favorise sa production. Les canaux et les rigoles qu'on creuse dans les prairies, et dans lesquels on dérive les eaux des rivières, ont pour effet non d'arroser le sol, car les infiltrations latérales n'ont que fort peu d'étendue, mais de répandre dans l'air une quantité de vapeur d'eau plus considérable, vapeur que les plantes fourragères s'assimilent avec avantage. Tout le monde a entendu parler des merveilleux effets du plâtre sur les prairies artificielles. Il y a lieu de croire que le plâtre agit ici, non comme stimulant, mais par sa légère déliquescence qui attire et fixe à la surface du sol la vapeur d'eau contenue dans l'air, et fournit à la racine des plantes l'humidité dont le contact leur est si précieux.

[redacted]

CHAPITRE XIX.

DES VAPEURS.

Principes généraux sur les vapeurs.

242. Les principes qui résument les propriétés de la vapeur sont ceux-ci :

1° La même quantité de vapeur se répand dans un espace ou vide ou plein d'air, toutes choses égales d'ailleurs : mais dans le vide, l'espace se remplit instantanément de toute la vapeur que cet espace peut recevoir; dans l'air, au contraire, cette diffusion se fait avec lenteur.

2° Dans un espace déterminé, à une température déterminée, et sous une pression déterminée, il peut exister bien des quantités différentes de vapeur; mais il y a un *maximum* qui ne saurait être dépassé, et qui constitue, eu égard à ces trois circonstances, ce qu'on appelle l'*état de saturation.*

3° La force élastique des vapeurs augmente avec la température, mais dans un rapport beaucoup plus grand. Ainsi à 100°, la tension de la vapeur d'eau est égale à une pression atmosphérique; à 266°, qui n'est pas une température triple, la force élastique est devenue 50 fois plus grande. Mais ceci suppose que la vapeur reste en contact avec son liquide, ou, ce qui revient au même, qu'il y

a toujours du liquide susceptible de donner de nouvelle vapeur. Dans le cas contraire, la vapeur est soumise, comme tous les autres gaz, à la loi des forces élastiques proportionnelles aux dilatations, elle augmente seulement de 0,003665 par degré, ce qui est comparativement fort peu de chose. Les vapeurs sont aussi, quant aux pressions, soumises à la loi de Mariotte, et l'augmentation énorme de force élastique par la chaleur en est sans doute une conséquence. Si à 266° par exemple, il se forme dans le même espace 50 fois autant de vapeur qu'à 100°, les vapeurs seront comprimées dans ces deux cas :: 1 : 50, et la force élastique devra être 50 fois plus considérable dans le second cas que dans le premier. En devenant plus chaude, la vapeur deviendrait plus dense. A 266°, la densité de la vapeur serait 50 fois 0,622, ou 31 environ par rapport à l'air pris pour unité, ce qui revient à $\frac{1}{25}$ de celle de l'eau. A 375° environ l'eau se vaporise complétement dans un espace quadruple; la densité de la vapeur est donc $\frac{1}{4}$; d'où il résulterait qu'à 375°, la force élastique serait de plus de 300 atmosphères, ou 312 kilogrammes par centimètre carré.

243. On fait sur l'évaporation par ébullition plusieurs expériences curieuses.

Ébullition par le froid. La première consiste à faire bouillir de l'eau par le moyen de la glace. Pour cela on porte d'abord à l'ébullition l'eau qui remplit un matras à moitié; la vapeur qui surmonte l'eau chasse entièrement l'air; dans cet état de choses, on ferme

hermétiquement le ballon et on le renverse. Si, lorsque l'ébullition a cessé, on met de la glace pilée G sur le fond du matras, en très-peu d'instants on voit l'ébullition se reproduire, et elle dure de la sorte assez long-temps. L'explication de cè phénomène est assez simple. Sous la pression ordinaire, l'ébullition ne se fait qu'à 100°, parce qu'à cette température seulement, la tension de la vapeur peut vaincre la pression atmosphérique; mais si celle-ci est remplacée par une pression beaucoup plus faible, une force élastique beaucoup moindre pourra en triompher, et l'ébullition se produira à basse température. Or, la glace appliquée au matras a pour effet de condenser en presque totalité la vapeur qui surmonte le liquide, et dont la tension remplace la pression atmosphérique; il ne restera donc que fort pèu de vapeur, d'où aussi fort peu de pression; donc la force élastique de la vapeur qui tend à se former à la température de l'eau pourra vaincre facilement cette faible puissance, ou, en d'autres termes, il se fera un dégagement de vapeur partant en bulles des points les plus chauds du liquide et du vase. La suppression de la glace détruira cet effet, parce que la chambre du matras s'emplira de vapeur chaude dont la tension s'opposera à une ébullition ultérieure; mais l'adhibition de la glace renouvellera ce phénomène, et ainsi de suite indéfiniment, jusqu'à ce que le refroidissement de l'ensemble ne permette plus à l'eau de former une vapeur assez chaude pour

vaincre la pression de celle qui restera dans la chambre.

Bouillant de Franklin.

244. Le *bouillant de Franklin*, est un petit appareil composé de deux boules réunies par un tube recourbé, et rempli en partie d'alcool rougi. Si l'on applique la main sur la boule B, la vapeur qui s'échauffe presse sur le liquide et le fait monter dans l'autre boule. Quand le liquide a quitté la partie B*a*, il y reste encore de la vapeur dont l'expansion produit des bulles à travers le liquide; la main retirée, la vapeur refroidie perd sa tension et le liquide retombe pour occuper sa position première. On ferait avec de l'air au lieu de vapeur dans les deux boules quelque chose de semblable, mais l'effet en serait beaucoup moindre, parce que quelques degrés ne lui donneraient qu'une expansion de $\frac{1}{23}$ environ.

245. On emploie beaucoup aujourd'hui une sorte de cafetière dans laquelle le café se prépare en deux à trois minutes. La construction et le jeu de cet appareil sont tout à fait dignes d'attention.

Cafetière à vapeur.

Un ballon A, qui s'ouvre en B pénètre par un long col *ao* dans un ballon inférieur M qu'il ferme très-hermétiquement; l'ouverture *o* du col est très-voisine du fond. On verse par le ballon supérieur de l'eau qui se rend dans le ballon inférieur en *mn*, et l'on jette quelques grammes de café en poudre dans le ballon A dont le fond est une

plaque de fer-blanc percée de très-petits trous qui ne permettent pas à la poudre de passer. Alors on applique au-dessous du ballon M une petite lampe à esprit de vin. L'eau de ce ballon ne tarde pas à entrer en ébullition. Alors sa vapeur s'appuyant sur le haut du globe, presse sur la surface liquide, et contraint l'eau à monter par le col *oa*, jusque dans le ballon supérieur; on conçoit aisément qu'elle y puisse passer tout entière, car la force élastique de la vapeur dont la température n'est pas très-inférieure à 100° pourrait soutenir plusieurs mètres d'eau. L'eau qui arrive très-chaude dans le ballon A, où elle rencontre la poudre de café, dissout très-rapidement la substance soluble, et après quelques minutes, la vapeur du ballon M qui s'est refroidie par suite de l'extinction de la petite lampe, n'a plus assez de tension pour soutenir une colonne liquide. L'eau saturée de café redescend donc par le col dans le ballon inférieur, en laissant en haut le marc qui ne peut traverser la plaque. Certains appareils portent en bas un robinet par lequel on retire le café liquide; d'autres, comme celui de la figure, portent un tube à robinet qui part du col près de la plaque de fond; un autre robinet *r*, convenablement fermé, empêche le liquide de retomber dans le ballon inférieur. Enfin il y a d'autres appareils, dans lesquels le ballon d'en bas est traversé par un siphon; la pression qu'exerce encore sur le liquide chaud du ballon M la vapeur chaude qui le surmonte, élève le liquide au-dessus de son niveau et dans le col et

dans le siphon, de telle sorte que celui-ci se trouve amorcé.

Cette cafetière fort commode, qui prépare toujours le café dans les meilleures conditions, est connue, sous le nom de cafetière Lyonnaise. Nous croyons qu'il conviendrait de la nommer cafetière *hydropneumatique*.

246. L'appareil que nous venons de décrire offre le fond du système de la machine à vapeur de *Savery* ou plutôt de Salomon de Caus: il n'y a ni corps de pompe ni piston; la vapeur n'agit qu'en élevant l'eau dans un tube, par la pression qu'elle exerce sur sa surface. Ce système est employé dans certains établissements de bains. Qu'on ajoute au-dessus du ballon M de la figure précédente, un tuyau à soupape qui plonge dans une rivière ou un grand réservoir quelconque, et un tube à robinet qui puisse apporter de la vapeur dans le ballon M. On fera d'abord arriver de la vapeur dans ce ballon; cette vapeur chassera l'air par l'orifice *o* et se mettra à sa place, pour se condenser ensuite par le refroidissement. Cette condensation donne lieu à un vide, dont l'effet sera de faire monter dans le ballon M l'eau du réservoir qui l'emplira en partie. Alors on fera arriver de nouvelle vapeur qui pressant sur la surface *mn* fera monter l'eau dans le ballon A, qui sera le réservoir d'eau pour les bains. Il y a beaucoup de vapeur consommée par son contact en *mn* avec l'eau froide; mais comme celle-ci se réchauffe à ses dépens, les frais sont en partie compensés. Il faut

moins de combustible pour porter l'eau à la température voulue.

247. On appelle *éolipyle* un vase pyriforme s'ouvrant par un tube très-étroit et qu'on manie au moyen d'un manche. On l'emploie depuis vingt siècles au moins à deux sortes d'expériences curieuses. Eolipyle.

Si on le remplit d'eau à moitié et qu'on le place sur le feu, il en résultera au bout de quelque temps un jet de vapeur très-rapide, dont le souffle est assez puissant pour mettre en mouvement divers appareils, comme ferait le vent lui-même. C'est de cette propriété de l'éolipyle que lui vient son nom. En entrant dans l'air, la vapeur se dilate, et il en résulte un refroidissement tel qu'elle paraît à peine tiède à la main. C'est le même effet qu'on observe sur la vapeur que rejettent dans l'atmosphère les machines à haute pression, après chaque coup de piston, et cependant la température de cette vapeur est très-supérieure à 100°.

Si, au lieu d'eau, on met dans l'éolipyle de l'alcool, on a un jet de vapeur qu'on peut enflammer; l'effet en est d'autant plus agréable, que le jet peut s'élever à plusieurs mètres. On remarque que la flamme ne commence qu'à quelques millimètres de l'ajutage, parce qu'à l'orifice le mouvement de la vapeur est trop rapide, ce qui produit l'effet d'un souffle sur la flamme d'une bougie. Si l'on tourne l'éolipyle de manière à ce que la vapeur se trouve enfermée de toutes parts entre

le niveau du liquide et la paroi intérieure du vase, elle presse sur le liquide et en fait jaillir une colonne par l'ajutage. Ce jet d'alcool liquide s'enflamme également.

248. La vapeur en s'échappant d'un vase mobile peut produire, comme l'eau et l'air, des effets de réaction, et faire reculer un petit chariot, mouvoir un tourniquet. La première machine à vapeur était un instrument de ce genre; elle est due à Héron d'Alexandrie.

249. Le *digesteur*, ou *marmite de Papin*, n'agit pas par la puissance de la vapeur, quoiqu'il en donne des jets doués d'une rapidité énorme.

Marmite de Papin.

C'est un vase en cuivre très-épais, dont le couvercle est maintenu par la pression d'une forte vis. Si de l'eau est renfermée dans ce vase, elle pourra s'y chauffer indéfiniment sans se vaporiser ni bouillir, puisqu'elle ne trouve point d'espace pour son expansion. Il est probable que sa température peut s'y élever jusqu'au rouge; le plomb, l'étain, le bismuth, peuvent s'y fondre. Si l'on y met des os, le liquide en dissout promptement la gélatine, et il n'en reste plus que la masse spongieuse et friable que présentent toujours les os calcinés. Si l'on débouche subitement la marmite, il s'en élance un jet de vapeur qu'accompagne un bruit extraordinaire, et qui laisse souvent la marmite à sec; quand il reste du liquide, celui-ci, quelque chaud qu'il fût dans le

digesteur, tombe à 100°. Cela tient à ce que toute température excédante a passé à l'état latent pour former la vapeur. Il semble que celle-ci dût être à une température énorme; mais son expansion dans l'air la refroidit d'abord à tel point, qu'on peut y tenir la main, dans le voisinage de la marmite. Il est remarquable qu'on ne saurait le faire impunément à une plus grande distance; d'où il faut conclure que, dans le premier cas, la grande vitesse du jet est pour beaucoup dans l'effet produit.

250. Une particularité fort importante dans le digesteur de Papin, est l'emploi d'une *soupape de sûreté*. C'est une sorte de bouchon métallique qui ferme hermétiquement un trou creusé à travers la paroi, et qui est maintenu dans cet état par un levier. Le point d'appui du levier est en *a*, celui d'application de la résistance est en *o* sur la soupape; la puissance est un poids qui agit en P avec un bras considérable. La pression qui appuie sur la soupape et la tient fermée, est égale au poids P multiplié par le rapport des deux bras de levier. Or, tant que la force élastique de la vapeur est moindre que la pression qui appuie la soupape, celle-ci s'opposera à la sortie de la vapeur. Mais quand cette pression sera dépassée par la force élastique intérieure, la soupape sera soulevée et la vapeur se précipitera au dehors. On peut donc faire en sorte que la vapeur n'atteigne jamais au delà d'une tension voulue, et cela en chargeant la soupape d'un poids moindre que cette tension. On Soupape de sûreté.

conçoit d'après cela pourquoi l'on donne le nom de soupape de sûreté à cet appareil. Toutes les chaudières de machines à vapeur sont pourvues de pareilles soupapes; cependant, il faut dire que leur service laisse beaucoup à désirer, comme nous l'expliquerons en son lieu.

Autoclaves. 251. On a voulu employer, il y a quelques années, la marmite de Papin à la confection du *pot-au-feu*, et à la préparation de toutes sortes d'aliments. La cuisson des viandes s'y opère en une demi-heure avec la plus grande perfection; mais des explosions ont eu lieu, malgré les soupapes de sûreté, et ces accidents ont fait tomber la mode des marmites *autoclaves*. On leur donnait ce dernier nom, parce que le couvercle, de forme elliptique, s'introduisait dans l'intérieur et s'appliquait contre un bourrelet saillant, de telle sorte, que la fermeture devenait d'autant plus hermétique que la vapeur pressait davantage. Ainsi, c'était la vapeur elle-même qui se fermait toute issue.

252. L'expansion de la vapeur d'eau, qui rappelle dans bien des cas l'explosion des armes à feu, a donné à M. Perkins l'idée des armes à vapeur.

Armes à vapeur. Une petite chaudière cylindrique en bronze très-épais et remplie d'eau était chauffée de manière à donner à la vapeur, qui en sortait au moment où on lui livrait passage, une tension de 40 atmosphères. Or, dans ce cas, le jet de vapeur pénétrait dans la chambre d'un canon ou d'un fusil, où les balles arrivaient latéralement par une espèce de trémie, et étaient chassées par la vapeur

d'une manière presque continue. Ces balles frappaient, dit-on, avec la même force que celles d'un fusil ordinaire. Des expériences faites en présence d'une commission que présidait le duc de Wellington, furent déclarées satisfaisantes. Toutefois, il ne paraît pas qu'on en ait été satisfait sous tous les rapports, puisqu'il n'y a pas été donné suite, et que les armes à vapeur semblent maintenant tombées dans l'oubli.

On observe souvent dans la manœuvre des canons ordinaires, les effets de la force expansive de la vapeur. Lorsqu'ils sont très-échauffés par un long tir, on les rafraîchit en y introduisant l'écouvillon mouillé; or, il se reproduit alors de la vapeur qui repousse vivement l'appareil lorsqu'il joue trop juste, et il est arrivé parfois que les servants de la pièce eurent le bras emporté par le recul violent et inattendu de l'écouvillon. Il est clair que cet accident ne peut être prévenu qu'en serrant la tête mouillée de l'appareil, de manière à ce qu'elle ait beaucoup de jeu.

253. Revenons ici sur la différence de vitesse que nous avons signalée au sujet de l'évaporation, selon qu'elle se fait dans un espace vide ou dans l'air. La quantité de vapeur qui saturera l'espace sera la même dans les deux cas; mais la vitesse d'évaporation sera très-différente : elle sera instantanée dans le vide, et si la vapeur est absorbée ou condensée, il y aura évaporation continue et très-rapide. C'est ce que nous avons déjà mis en évidence quand il s'agissait de faire de la glace sous

Évaporation rapide.

la machine pneumatique. Or, on met à profit cette règle pour produire l'évaporation rapide des sirops dans les sucreries. On entretient le vide au moyen de pompes pneumatiques dans un alambic muni de son serpentin ; l'eau du sirop se vaporise, et la vapeur se condense sans cesse dans le tuyau du réfrigérant. Il en résulte une dessiccation très-rapide à médiocre température, et le sirop paraît être moins altéré que par la dessiccation sous l'atmosphère. Ce procédé est connu sous le nom de méthode de Howard.

254. Nous allons nous occuper maintenant des machines à vapeur. Pour mettre le lecteur en état de suivre la théorie que nous allons en donner, nous rappellerons : 1° que la force élastique de la vapeur, qui est de 5 millimètres à zéro, est à 100° de 760 millimètres ou une atmosphère ; 2° qu'elle croît avec les températures entre 0° et 200° dans les rapports suivants :

Table des forces élastiques.

	Atmosphères.		Atmosphères,
A 100°......	1	A 163°,5.....	6 $\frac{1}{2}$
112°,2.....	1 $\frac{1}{2}$	166°,5.....	7
121°,4.....	2	169°,4.....	7 $\frac{1}{2}$
128°,8.....	2 $\frac{1}{2}$	172°,1.....	8
135°,1.....	3	177°,1.....	9
140°,6.....	3 $\frac{1}{2}$	181°,6.....	10
145°,4.....	4	186°,0.....	11
149°,1.....	4 $\frac{1}{2}$	190°,0.....	12
153°,1.....	5	193°,7.....	13
156°,8.....	5 $\frac{1}{2}$	197°,2.....	14
160°,2.....	6	200°,5.....	15

3° qu'à 224°, la tension est de 24 atmosphères,

et qu'à 266°, elle atteint 50. Enfin, nous signalerons encore ce principe : que lorsque la vapeur se trouve répandue dans un espace dont les diverses parties ont différentes températures, elle prend une tension uniforme, égale à la tension qu'elle aurait naturellement si l'espace était partout à la température la plus basse.

255. Cela posé, nous distinguerons trois catégories de machines à vapeur.

Dans les premières, la vapeur agit directement sur une masse d'eau à soulever; c'est le genre d'action que nous avons suffisamment décrit aux nos 245 et 246. Ce système est peu employé. C'est celui des machines dites de Savery. Machines de Savery.

La seconde se compose des machines dites atmosphériques; le moteur est la pression de l'atmosphère agissant sur un piston dans un corps de pompe. Le rôle de la vapeur se réduit à chasser l'air et à faire ensuite le vide par sa condensation. C'est le système de Newcommen, dont voici en peu de mots le mécanisme.

Aux deux extrémités d'un balancier arqué sont suspendues, par des chaînes, les tiges de deux pistons : l'un, qui peut être le moins large, joue dans un corps de pompe ordinaire et est destiné à soulever de l'eau ; l'autre se meut dans un corps de pompe et reçoit de la vapeur par-dessous. Cette vapeur, dès son entrée, chasse l'air par une soupape latérale et prend sa place ; puis elle est condensée par un jet d'eau froide qui fait le vide. Dès lors, la pression atmosphérique entraîne ce pis- Machine atmosphérique.

ton au bas du corps de pompe; le petit piston de l'autre côté ne saurait lui faire contre-poids, car il n'est chargé que du poids d'une colonne d'eau égale à la colonne déjà soulevée, ce qui est moindre qu'une pression atmosphérique; et si l'eau avait déjà passé par-dessus et devait monter à une très-grande hauteur, on peut diminuer la surface de ce piston pour contre-balancer cet excès de poids. Une fois le grand piston arrivé au bas de sa course, on donne de la vapeur au-dessous, ce qui contre-balance tout juste la pression supérieure, et pour relever le piston, il suffit d'appliquer une force qui l'emporte un peu sur son poids augmenté du frottement. Or, c'est ce que réalise le petit piston au moyen de son propre poids, considérablement augmenté par celui de la colonne d'eau qui pèse sur lui. Le grand piston est remis dans l'état primitif; il ne s'agit donc que de recommencer la même manœuvre par l'admission d'une nouvelle vapeur. Ainsi dans ce système, la vapeur n'agit pas par impulsion; elle n'est qu'un instrument de vide, une sorte de machine pneumatique, et c'est la pression atmosphérique qui est le moteur. Cette machine est dite *à simple effet*, parce qu'il n'y a qu'un des deux mouvements du piston qui soit productif. On en trouve encore quelques-unes d'employées dans les mines d'Angleterre, où elles ne le sont que pour produire des épuisements.

Machine de Watt.

256. Dans le troisième genre de machines, qui aujourd'hui sont à peu près les seules usitées, la va-

peur agit par impulsion directe sur les deux faces du piston. Des tuyaux l'amènent de la chaudière où elle s'engendre dans le corps de pompe qui est fermé par les extrémités. Quand elle vient au-dessous du piston, la vapeur qui se trouve au-dessus est rejetée au dehors, de sorte qu'il y a vide de ce côté, et que rien ne s'oppose au mouvement ascendant du piston ; de même, quand la vapeur arrive au-dessus, celle qui se trouve au-dessous abandonne le corps de pompe, et n'oppose, par conséquent, aucune résistance à la descente. Or, en montant et descendant ainsi, le piston, par l'intermédiaire de sa tige, communique son mouvement ou à l'une des extrémités d'un balancier, ou à une traverse dont les extrémités entraînent des bielles qui transmettent ce mouvement à tout le reste de la machine. Pour le moment nous ne nous occuperons que du moteur.

L'introduction de la vapeur au-dessus et au-dessous du piston successivement se règle par un mécanisme que nous décrirons plus bas. Quant à la sortie de la vapeur hors de la région du corps de pompe où le vide doit être fait, elle s'opère de deux manières différentes, suivant que les machines sont à *basse* ou à *haute pression.*

257. Dans les machines à *basse pression*, c'est-à-dire, celles où la température de la vapeur ne dépasse pas 100°, et où sa tension est d'*une atmosphère*, on lui donne issue, dans un récipient séparé du corps de la machine, et désigné sous le nom de *condenseur*. Ce récipient est en- Basse pression.

touré d'eau fraîche, ou bien, ce qui est plus efficace, il reçoit continuellement à l'intérieur un jet de liquide; d'ailleurs, il est maintenu vide d'eau et d'air, au moyen d'une pompe pneumatique que la machine elle-même met en mouvement. Au moment où la communication s'ouvre entre le bas du corps de pompe, par exemple, et le condenseur, la vapeur se précipite instantanément dans ce vase qui est vide; elle s'y refroidit et s'y condense, ce qui fait un nouveau vide dans lequel se loge définitivement une très-petite quantité de vapeur à faible tension; c'est aussi ce qui reste dans le corps de pompe, de sorte que la vapeur qui agit de l'autre côté du piston, ne trouve qu'un très-petit obstacle à vaincre pour le pousser devant elle. La condensation continuelle de la vapeur, et l'eau qu'elle fournit au condenseur, et par suite à la pompe qui vide le vase, donnent lieu à un déversement continuel d'eau chaude à l'extérieur de la machine. C'est cet écoulement au dehors qui fait reconnaître les machines à basse pression.

Haute pression.

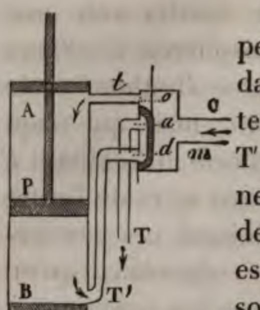
258. Dans les machines à *haute pression*, la force élastique de la vapeur est poussée à deux atmosphères, au moins; le plus souvent, elle l'est à 3, 4, 8 atmosphères même. Or, alors on lui donne issue directement dans l'air. Quand s'ouvre la soupape par laquelle le passage lui est laissé libre, elle oppose sa tension de plusieurs atmosphères à l'atmosphère unique qu'elle rencontre à l'extérieur; et si elle est à 6 atmosphères, par

exemple, il est clair qu'elle sortira avec une puissance complète de 5 atmosphères. D'ailleurs il restera au dedans une force élastique égale à une atmosphère précisément, mais qui n'opposera à son tour qu'un obstacle insignifiant à la haute tension de la vapeur qui agira de l'autre côté. C'est ainsi que se produisent ces jets saccadés ou bouffées de vapeur vésiculaire qu'on remarque à l'extérieur de toutes les machines à haute pression, et qui les fait reconnaître pour telles.

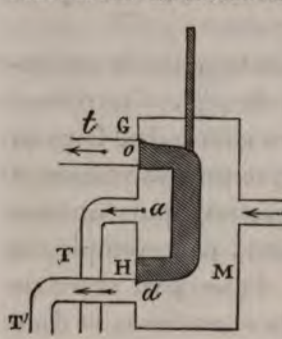
259. Quel que soit d'ailleurs le genre de machines, sous ce rapport, il s'agit de régler l'introduction et la sortie de la vapeur, c'est-à-dire faire en sorte que la vapeur n'entre que successivement et au-dessous et au-dessus du piston, puis obtenir que lorsqu'elle arrive au haut, par exemple, la communication soit fermée d'une part entre le bas du corps de pompe et la chaudière, et d'autre part, ouverte entre le bas du corps de pompe et le condenseur, ou, au lieu de celui-ci, l'orifice qui rejette la vapeur dans l'atmosphère. De même, lorsque la vapeur arrivera de la chaudière au bas du corps de pompe, le passage entre la chaudière et le dessus du piston devra être barré, tandis qu'au contraire, la communication sera ouverte entre le dessus du piston et soit le condenseur, soit l'atmosphère. Pour arriver à ce but, on a passé par différents systèmes de robinets et de soupapes, et l'on s'est arrêté au très-simple système que voici.

Mouvement de la vapeur dans les machines.

Appareil à tiroir.



Le tuyau C qui amène la vapeur de la chaudière débouche dans une boîte *m*, d'où partent trois autres tuyaux *t*, T, T' dont les deux premiers amènent la vapeur au-dessus et au-dessous du piston, le troisième est destiné à lui donner issue soit dans le condenseur soit dans l'air. Dans la boîte *m*, joue une pièce qu'on voit plus en grand dans la fig. 2. et qui porte le nom de *tiroir*. Supposons que la vapeur doive arriver au-dessus du piston. On voit (fig. 1) que le tiroir ne lui fera pas obstacle, et qu'elle enfilera le tuyau *ot;* mais dans cette position du tiroir qui lui livre passage, communication est ouverte entre le bas du corps de pompe et le ventre du tiroir par le tube T'*d*. La vapeur qui vient par là peut enfiler le tube *a*T que le tiroir ne bouche pas actuellement, et trouve, par ce tuyau, issue à l'extérieur. Mais lorsque, par le mouvement de la machine, et de la tige du tiroir, cet appareil se sera déplacé, et occupera la position qu'on voit dans la seconde figure, la vapeur de la chaudière passera par le tube *d*T' au-dessous du piston; elle ne pourra passer par-dessus à travers le conduit *ot* bouché actuellement par le tiroir, ou s'ouvrant



dans sa concavité quand il s'élève encore plus haut ; enfin la vapeur supérieure au piston, et dont il faut se débarrasser, viendra par ce conduit *ot* dans la concavité du tiroir, et enfilera sans difficulté le tuyau d'issue *a*T. Une étude attentive de ces deux figures fera comprendre très-nettement ce double jeu. Le tiroir est une pièce de bois à surfaces bien unies qui s'applique parfaitement à la paroi où débouchent les trois tuyaux : son jeu est, dit-on, d'autant plus parfait, que cette pièce a plus d'usage.

Ainsi on introduira la vapeur successivement des deux côtés du piston, et comme on peut augmenter à volonté son diamètre et la tension de la vapeur, on lui imprimera un mouvement aussi puissant qu'on le voudra. Ce n'est qu'un mouvement vertical de va-et-vient, mais on peut le transformer à volonté, particulièrement en mouvement de rotation au moyen de manivelles et de volants, selon la théorie que nous avons donnée n°s 6 et 13.

260. Au lieu de laisser arriver la vapeur jusqu'à ce que le piston soit au bout de sa course, on interrompt souvent son afflux lorsque le piston n'a encore parcouru qu'une partie du chemin ; alors il continue sa route par la *détente* de la vapeur qui s'ajoute à la vitesse acquise. La vapeur introduite se dilate dans l'espace que le piston ouvre devant elle, en perdant de sa force élastique, d'après la loi de Mariotte, de telle façon néanmoins qu'il en reste assez pour produire un effet utile. Supposons, par exemple, qu'elle entre avec une

Détente de la vapeur.

tension de 4 atmosphères, et soit arrêtée aux $\frac{2}{3}$ de la course du piston. Alors un volume 2 deviendra 3, et la force élastique avec laquelle elle poussera le piston au dernier moment sera le 4e terme de la proportion :

$$3 : 2 :: 4 : x = 2,66.$$

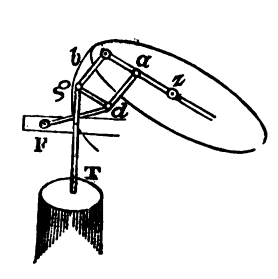
L'emploi de la détente offre une économie manifeste de combustible, d'autant plus que la production de la vapeur à haute pression n'exige pas plus de chaleur que les tensions moindres.

261. Ce qui précède, suffit pour faire nettement comprendre le genre d'action que la vapeur exerce dans les machines que nous avons ici en vue, et qui offrent le système de Watt à double effet. Examinons maintenant les détails du mécanisme, et les circonstances principales qui jouent un rôle dans la direction de ces merveilleuses machines.

Pistons. Nous remarquons d'abord le piston, cylindre métallique aplati, formé de trois segments que des ressorts intérieurs appuient constamment contre les parois du corps de pompe. Grâce à cette poussée, les pistons s'appliquent toujours parfaitement bien contre les parois, alors même qu'un long usage en a rongé la surface.

La tige du piston met en mouvement tantôt une barre transversale *a b*, qui entraîne verticalement deux bielles, *b c*, *a d*, et par leur moyen produit un mouvement de rotation; tantôt, au contraire, cette tige pousse l'une

des extrémités d'un balancier dont l'autre extrémité fait mouvoir une tige semblable. Or, il fallait conserver aux deux tiges leur verticalité, ce qui était un problème à résoudre, attendu que les deux bouts du balancier décrivent des arcs de cercle. Watt y est parvenu par l'invention du *parallélogramme articulé*. On voit en *zb* ce bras du balancier qui tourne autour du point *z* comme centre, et dont le bout *b* doit décrire un arc de cercle. Si l'effet de ce mouvement est de jeter le point *g* de sa tige hors de la verticale à droite du lecteur, la barre F*d* fixe en F, tend au contraire à la reporter vers la gauche, en faisant reculer la charnière *d*. Le parallélogramme *abgd*, qui prend toutes sortes d'angles, est assujetti par la barre inflexible F*d*. Balanciers.

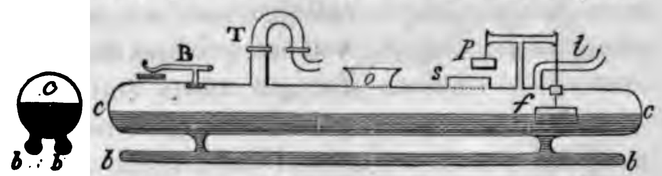


Nous avons décrit ailleurs le volant, le régulateur à force centrifuge, et la transformation du mouvement vertical en mouvement de rotation par des manivelles. Nous ferons remarquer à ce sujet que ce n'est pas de prime abord qu'on a imaginé ce mode de transformation dont le rouet des fileuses mettait un exemple sous les yeux des mécaniciens : divers appareils fort compliqués ont été mis en œuvre avant qu'on pensât à celui-là.

262. Occupons-nous maintenant de ce qui concerne la chaudière.

Chaudière. Bouilleurs.

Au lieu de donner à ce récipient la forme sphérique comme on le faisait autrefois, on le fait en forme de cylindre allongé terminé par deux hémisphères; cette forme est moins sujette à déformation. Au-dessous de ce cylindre *cc*, sont deux autres cylindres plus petits *bb*, appelés *bouilleurs*, qui communiquent avec lui, et plon-



gent immédiatement dans la flamme du foyer, auquel ils offrent une large surface. En *o* se trouve une large ouverture : c'est le *trou de l'homme*, par lequel on descend dans la chaudière pour la nettoyer. En T est le tuyau de distribution de la vapeur; en B une soupape de sûreté; en S, une autre soupape s'ouvrant de dehors en dedans, pour donner accès à l'air extérieur en cas de vide, et prévenir ainsi les déformations. On voit en *f* le *flotteur*, en *t* le *tuyau d'alimentation* de la chaudière. Le flotteur est ordinairement une large pierre maintenue en équilibre par le contre-poids P, de manière à ne plonger dans l'eau qu'en partie. Le fil qui soutient le flotteur passe par une boîte à étoupes, et porte un bouchon métallique qui ferme le tuyau *t* quand l'eau est à un niveau convenable. Mais quand le niveau s'abaisse, le flotteur baisse avec lui et tire le bouchon dont la partie supérieure qui est échancrée

laisse un libre passage à l'eau qui vient par le tuyau d'alimentation. Si la machine est à haute pression, la force élastique de la vapeur mettrait obstacle à l'entrée d'une colonne d'eau qui est beaucoup moindre que celle qu'elle pourrait supporter; alors l'eau est introduite par une pompe foulante que la machine elle-même met en jeu; cette pompe fonctionne par conséquent sans interruption. Alors il se fait une réserve dans le tuyau *t*, dès que le passage est fermé par le bouchon *b;* et de temps en temps, d'après les indications du flotteur, un ouvrier ouvre un robinet pour laisser arriver de l'eau dans la chaudière.

263. Celle-ci porte encore des accessoires importants, outre le tuyau de dégagement de la vapeur quand on veut la rejeter au dehors : ce sont principalement le *manomètre,* et les *rondelles fusibles.*

Le manomètre, que nous avons déjà Manomètre.
décrit ailleurs, débouche dans la chaudière en D; il contient une colonne de mercure *mgn*, au sommet *n* de laquelle la vapeur exerce sa pression. En *oh* se trouve un petit volume d'air emprisonné par le mercure, et qui, par la réduction successive de son volume, indique, selon la loi de Mariotte, la pression qu'il subit. La tension de la vapeur a pour mesure une pression atmosphérique multipliée par le rapport du volume primitif au volume réduit, plus le poids de la colonne de mercure *om*, qui fait la différence des niveaux. Une

échelle établie le long du tube manométrique dispense de faire les calculs. Dès que les indications de cet instrument font reconnaître que la tension de la vapeur est plus grande qu'une certaine limite qu'on ne doit pas dépasser, on ouvre une des soupapes de sûreté, et l'on diminue le feu. Si l'on pouvait toujours agir avec l'attention et la rapidité convenables, le manomètre serait l'appareil de sûreté le plus parfait. Mais ces conditions ne peuvent pas être toujours remplies. Il a été proposé de mettre le manomètre des bateaux à vapeur, en vue de tous les passagers, pour que le soin de leur sûreté, excité sans cesse par cette vue, suppléât à l'insouciance ordinaire des chauffeurs. Tant d'intéressés, naturellement craintifs, ne laisseraient pas le manomètre s'élever au delà de la limite convenue, et contraindraient les ouvriers qui gouvernent le feu à modérer son action.

Rondelles fusibles.

264. Les *rondelles fusibles* sont aussi des pièces de sûreté, sur lesquelles il ne faut pas trop compter non plus, mais qui offrent néanmoins des motifs de sécurité raisonnables. Ce sont des pièces de métal fusible à basse température, et qui remplacent une petite partie des parois de la chaudière. Ce métal est un alliage composé de bismuth, de plomb et d'étain; suivant les proportions de ses éléments, l'alliage fond à des températures diverses. Dans les proportions de 8 de bismuth, 5 de plomb et 3 d'étain, l'alliage fond à 90°. Ce n'est pas celui-là qu'on emploie, mais on en prend deux qui fondent l'un à 10°, l'autre

à 20° au-dessus de la température à laquelle doit travailler la machine. Or, si les 10° d'excès sont atteints, ce qui donne à la vapeur une tension qui pourrait être dangereuse, la rondelle se ramollit, puis fond et coule dans la chaudière en laissant un trou par lequel la vapeur s'échappe. Si les choses se passent ainsi, tout danger est écarté, mais la machine est pour le moment hors de service. On conçoit qu'il ne fallait pas mettre le terme de fusion tout à fait à la limite de la force élastique voulue; car, comme il est impossible d'empêcher de petites oscillations autour de cette limite, le travail de la machine serait à chaque instant compromis. Mais, quoique très-utiles assurément, les rondelles fusibles ne sont pas un préservateur certain; car d'abord elles ne sauraient prémunir contre les effets brusques dont nous allons parler, mais de plus, elles n'ont pas le temps de fondre et d'ouvrir une issue un peu large quand la tension de la vapeur augmente dans une proportion un peu rapide.

265. Il n'arrive que trop souvent que les chaudières font explosion, et chacun sait quels désastres peut entraîner un accident de ce genre. Malheureusement, on ne possède pas encore, et l'on ne possédera peut-être jamais le moyen de parer complétement aux explosions, dont les causes ne sont probablement pas toutes connues, et qu'il n'est peut-être pas en notre pouvoir de prévenir. Arrêtons-nous quelques instants sur ce sujet.

Causes diverses d'explosion; préservatifs.

Nous connaissons plusieurs cas d'explosion possible. Si, par exemple, la soupape a été chargée au delà d'une certaine limite, elle ne pourra pas jouer quand la vapeur aura atteint une tension dangereuse. Or, il est arrivé parfois que les ouvriers, pour donner plus d'action à la machine, ont surchargé les soupapes. On prévient de tels abus, et les accidents qui peuvent s'ensuivre, en enfermant les soupapes sous des grillages à clef.

Il peut arriver aussi que la soupape, quoique chargée convenablement, ne fonctionne pas lorsque la vapeur atteint et dépasse la tension équivalente à sa charge. Il se fait souvent une adhérence fâcheuse entre les surfaces internes; quelquefois même la soupape, entr'ouverte par une tension considérable, peut être retenue près des bords par une cause analogue à celle qui produit la célèbre expérience de Griffith; toutefois, cette dernière explication ne saurait s'appliquer aux chaudières à haute pression.

266. On a indiqué comme cause explosive le dépôt qui se forme dans les chaudières, par l'évaporation d'une eau qui contient en dissolution des matières salines. A la longue, il se formerait au fond de la chaudière une croûte d'une nature peu conductrice, qui, transmettant mal la chaleur du foyer à l'eau, permettrait au métal de s'élever jusqu'à la température rouge, quoique l'eau ne fût pas à plus de 100° ou 120°. Or, imaginons qu'il se produise une fissure dans cette croûte. L'eau

tombant par là sur le métal rouge de feu, développera instantanément une très-grande quantité de vapeur, contre l'action de laquelle les divers appareils préservateurs n'auront pas le temps d'exercer leur action défensive. On peut prévenir les accidents de cette nature, en nettoyant régulièrement les chaudières, et mêlant à l'eau des substances qui la rendent visqueuse et forment des dépôts boueux au lieu de sédiments secs. La pulpe de pomme de terre semble convenir parfaitement à cet usage.

267. Une autre cause d'explosion consiste dans l'alimentation imparfaite des chaudières, combinée avec le jeu des soupapes elles-mêmes. Supposons, en effet, que le niveau de l'eau dans la chaudière descende trop bas; si la flamme du foyer embrasse une grande partie de la chaudière, il pourra arriver qu'elle en échauffera les parois au-dessus du niveau de l'eau, beaucoup au delà de la température de celle-ci : dans certains cas, l'échauffement pourrait s'élever jusqu'au rouge. La vapeur qui se forme, quelle que soit d'ailleurs sa température, a nécessairement la même tension partout. Supposons que la soupape vienne à s'ouvrir, une partie de la vapeur s'échappera dans l'atmosphère, ce qui diminuera la pression exercée sur l'eau; il en résultera une ébullition vive et tumultueuse, qui pourra porter l'eau au contact des parois incandescentes : de là, la formation subite d'une très-grande quantité de vapeur à haute tension, dont l'effort pourra briser la chaudière,

surtout si la soupape est refermée. Il faut remarquer toutefois, que ce n'est pas au contact du métal rouge que cette vapeur se forme, mais alors seulement que les parois se sont refroidies au-dessous de cette nuance, tout en conservant une température encore très-supérieure à celle de l'eau. Il est important de remarquer aussi que dans le cas qui nous occupe, il y a choc *brusque;* or, cette condition exalte singulièrement l'action produite par une force quelconque. Le moyen de parer à ce danger consiste à veiller avec soin l'alimentation de la chaudière; et si la soupape s'ouvre, il faut pendant quelque temps la maintenir dans cet état.

268. On a encore indiqué plusieurs autres causes d'explosion, mais il n'y a rien peut-être dans ce qui a été dit à ce sujet qui puisse être discuté avec des données expérimentales suffisantes. Il n'y a pas jusqu'à l'électricité qui n'ait été appelée à y jouer un rôle. Jusqu'à présent, il n'y a de bien reconnu que les causes que nous venons de signaler, et tous les accidents produits jusqu'à ce jour ont pu se rapporter à l'une d'elles. Il n'y a donc autre chose à faire qu'à tenir en bon état le jeu des soupapes, les rondelles fusibles, l'alimentation de la chaudière, et sa netteté intérieure, et de veiller avec soin aux indications du manomètre. Nous n'avons pas besoin de dire que la chaudière doit être par elle-même en bon état; les détériorations qu'amène l'usage, des défauts dans le métal employé, peu-

vent être des causes de rupture. Les ordonnances exigent que les chaudières, avant d'être livrées, soient éprouvées à la presse hydraulique : elles doivent supporter, sans la moindre trace d'accident, une pression cinq fois aussi considérable que la tension de la vapeur sous laquelle elles doivent travailler. Ce chiffre n'est point trop exigeant, comme on pourrait le croire, attendu que les chaudières sont essayées à froid; or, la ténacité du métal à chaud est beaucoup moindre que celle qu'il offre à froid à la presse hydraulique.

269. Le balancier fait marcher trois pompes, outre le piston moteur et le piston d'aspiration dans les machines à épuisement. Du côté du moteur se trouve la pompe alimentaire qui aspire l'eau chaude venant du condenseur, et la foule dans le tuyau d'alimentation. De l'autre côté se trouvent la pompe à air, qui aspire tout ce qui se trouve dans le condenseur et en déverse l'eau déjà chaude dans un bassin où elle est saisie par la pompe alimentaire, et la pompe à eau froide, qui prend à son tour dans un puits, dans la rivière, ou dans la mer, l'eau qui doit arroser l'intérieur du condenseur. Pompes diverses.

270. On conçoit que le système que nous venons d'étudier, n'est pas le seul qu'on puisse employer; il y une variété extrême de machines à vapeur, qui n'ont de commun que le principe de l'impulsion directe de la vapeur contre un piston, dont le mouvement se modifie ensuite à volonté. Encore existe-t-il des machines où l'on

a tenté d'appliquer la vapeur comme l'eau dans les turbines; elle produirait un mouvement de rotation analogue par son choc dans des augets convenablement disposés.

lachine de Woolf.

Parmi les machines à piston, nous distinguerons deux espèces qui sont à plusieurs égards très-dignes de remarque. L'une, dite du système de Woolf, est à deux pistons et à détente. L'un des pistons P a une section beaucoup plus considérable que l'autre; tous deux montent et descendent ensemble, le plus petit par l'action directe de la vapeur, qui, au lieu de passer ensuite dans le condenseur ou dans l'atmosphère, va par des tubes croisés agir sur le grand piston. La différence des espaces occasionne la détente de la vapeur, qui agit sur le grand piston en même temps qu'elle fuit devant le petit, et lui donne un mouvement semblable. Si les deux pistons étaient égaux, aucun effet ne pourrait se produire, car la vapeur résisterait au piston qui la pousse avec la même puissance qu'elle exercerait pour pousser l'autre piston; les réactions sur les autres faces seraient aussi égales : il y aurait donc équilibre. Mais avec des pistons très-inégaux et une tension de vapeur uniforme, il est évident que le grand piston sera plus pressé que le petit à proportion de sa surface. On comprend aisément que dans ce système, il ne faut pas que la vapeur qui passe dans le grand cylindre s'y condense même en partie; aussi l'appareil est-il

entouré d'une chemise en fonte; entre cette enveloppe et les cylindres, circule de la vapeur qui met obstacle au refroidissement.

271. Nous remarquerons aussi les machines à *cylindre oscillant*. Le corps de pompe, comme les canons sur leur affût, est porté sur des coussinets par des tourillons creux qui lui amènent la vapeur; le piston qui agit directement sur les manivelles rotatives change à chaque instant sa position par rapport au sol, et a une sorte de mouvement conique. Ce mouvement détermine les balancements du corps de pompe. Ce système de machine, qui supprime le balancier, offre le double avantage de perdre par là moins de force, et de pouvoir occuper un espace beaucoup moins considérable; il convient donc dans les lieux nécessairement resserrés, où il importe de ménager la place, dans certains bateaux à vapeur, par exemple. Oscillants.

272. L'évaluation de la force d'une machine à vapeur se fait de différentes manières. Évaluation de la force des machines.

On se fait d'abord une idée générale de sa puissance en considérant le poids auquel peut faire équilibre une vapeur d'une tension donnée sur une surface donnée. Soit le diamètre du piston un mètre; sa surface contiendra 7854 centimètres carrés; une pression atmosphérique par centimètre équivaut à $1^k,04$; la vapeur à $100°$ ferait donc équilibre à un poids de $7854 \times 1,04 =$ 8168 kilogrammes. Si la tension de la vapeur est de 3 atmosphères, il faudra tripler ce nom-

bre, et l'on aura 24504 kilogrammes pour la mesure de la première impulsion de la vapeur sur le piston.

Mais ce calcul ne fait nullement connaître la quantité de travail dont une machine est susceptible, travail qu'on mesure par la force vive, ou par le poids élevé en une seconde à une certaine hauteur. Supposons que la tension de la vapeur soit 5 atmosphères, la course du piston 2 mètres, son diamètre 1 mètre, le nombre de coups de piston par minute, 22. Nous aurons par centimètre carré $5 \times 1^{k},04$, pour le piston tout entier $5 \times 1,04 \times 7854$ kilog. élevés à 2 mètres ou le double de ce poids à 1 mètre. Si le mouvement du piston durait une seconde, le produit de la machine serait le nombre précédent multiplié par 2. Mais il y a 22 coups dans une minute, ou dans une seconde $\frac{22}{60}$. Le résultat sera donc les $\frac{22}{60}$ seulement de ce qu'il serait s'il y avait un coup par seconde; on aura donc en résumé : $5 \times 1,04 \times 7854 \times 2 \times \frac{22}{60}$ kilog. pour le poids élevé dans une seconde à 1 mètre. Ce produit est 29949 kilog. Or, on est convenu d'appeler force de cheval, en matière de vapeur, un poids de 75 kilog. élevé à 1^{m} en $1''$; divisant donc le nombre précédent par 75, on trouve 399 chevaux pour la force de la machine dont il s'agit.

En général, si l'on appelle θ la tension de la vapeur en atmosphères, d le diamètre du piston en mètres, h sa course, n le nombre de coups par minute, on généralisera le calcul précédent,

et l'on aura pour le nombre N de chevaux vapeur que donne théoriquement la machine :

$$N = \frac{1,04.7854\, h\, n\, \theta\, d^2}{60.75}.$$

Mais il y a un déchet considérable dû aux frottements, aux fuites de vapeur, et à la force absorbée par les pompes auxiliaires : on l'estime sommairement aux 0,4 de la force théorique. Il faut donc multiplier la valeur précédente par 0,6 seulement. De plus, la puissance de la vapeur sur le piston doit être diminuée de la résistance de la vapeur qui reste de l'autre côté : dans les machines à condenseur, on l'évalue à $\frac{1}{20}$ d'atmosphère ; dans celles à haute pression, elle est toujours égale à une atmosphère tout juste ; il faut donc encore faire cette déduction. La faisant pour les hautes machines seulement, où nous avons à remplacer θ par $0,6\ \theta$, et en réduisant le nombre fractionnaire : $\frac{1,04.7854}{60.75} = 1,8133$, on a définitivement : $N = 1,8133\ d^2 h n (0,6 \theta - 1)$ pour le nombre de chevaux représentant la force effective de la machine. Si l'on y fait, comme dans l'exemple précédent : $h = 2$, $n = 22$, $d = 1$, $\theta = 5$, il vient $N = 159$ chevaux environ, au lieu de 399 que nous avions trouvés, en ne tenant pas compte des déchets.

Toutefois, cette dernière formule n'est pas encore le dernier mot du calcul des machines. Elle suppose que le piston fonctionne toujours à pleine vapeur. Si, comme on le pratique généralement aujourd'hui, on interrompt l'arrivée à un certain

point de sa course pour laisser agir la détente, le résultat est essentiellement modifié : on aurait une sorte d'approximation en prenant une moyenne entre le résultat précédent, et celui qu'on obtiendra en réduisant la course du piston à ce qu'il parcourt à pleine vapeur. Mais, si l'on tenait à une appréciation un peu rigoureuse de l'effet de la détente, il faudrait s'en rapporter à une formule plus complexe, dont il est impossible de donner ici la théorie. Cette formule est la suivante :

$$1{,}8133\, d^2 n h \left(f\theta \left(1 + \log. \tfrac{1}{f}\right) - 0{,}4\,\theta - 1\right),$$

où f désigne la fraction de la course du piston parcourue à pleine vapeur. En y faisant $f = 1$, on retombe sur la formule précédente.

Toutefois ce rapprochement n'a qu'un intérêt médiocre, attendu que le coefficient de déchet 0,4 est un nombre d'une précision plus que problématique, qui peut être considéré comme une moyenne générale, il est vrai, mais qui peut varier extrêmement d'une machine à l'autre. Dans chaque cas donné, les formules ci-dessus ne fournissent que des résultats équivoques, et il faut en général recourir à la mesure par le *frein de Prony*, dont nous avons donné la théorie et la formule au n° 59.

Reprenons cette formule $\varphi = \frac{2\pi r p n}{t}$, et supposons $r = 2{,}1$... $p = 220$, $n = 22$, $t = 40''$.... il viendra... $\varphi = \frac{2.3{,}1416.2{,}1.220.22}{40} = 1597$ kilog., ou un peu plus de 21 chevaux.

Quand les machines servent seulement à élever l'eau, on peut, en les supposant parfaites, déter-

miner leur force par le produit qu'elles donnent. La pompe à feu de Chaillot, qui fait monter 1750 hectolitres d'eau par heure à 36 mètres, ce qui revient à 1750 litres ou kilogrammes à 1 mètre par seconde, a donc pour puissance $\frac{1750}{75}=24$ chevaux à peu près. La magnifique machine à feu de Marly peut élever 24000 hectolitres par jour à 162 mètres de hauteur; ce qui revient à 4500 kil., ou $4^{m.c.},5$ par seconde; on lui trouve ainsi une force de 60 chevaux.

273. On emploie les machines à basse ou à haute pression selon le but qu'on se propose. Les premières sont préférées quand on se propose une régularité parfaite dans le mouvement, comme dans les filatures, où l'uniforme tension des fils est de rigueur. Dans des machines à haute pression, une très-petite variation de température en introduit une très-grande dans la tension de la vapeur, et par suite dans la rapidité du mouvement; le même inconvénient n'a pas lieu dans les machines à basse pression. De plus, on peut, dans les machines à terre, établir de très-grands et très-lourds volants qui sont des réservoirs de force, et contribuent à entretenir la régularité. Mais, dans d'autres circonstances, le volant n'est pas possible. Dans les bateaux à vapeur, on se tient généralement au système de la basse pression; la raison principale en est sans doute, qu'on a l'eau de condensation sous la main. Les locomotives, au contraire, doivent être à haute pression, pour n'avoir pas la charge et de l'eau de condensation

Comparaison des machines à basse et haute pression.

et du condenseur lui-même. En général, on préférera toujours la haute pression là où l'on ne pourra avoir de l'eau en abondance; mais on la préfère aussi en général, comme donnant un travail plus économique. En effet, on sait qu'une même quantité de calorique, et de combustible par conséquent, peut élever la vapeur à une température quelconque, ou, ce qui revient au même, à une force élastique quelconque; on obtient donc pour le même prix une plus grande somme de travail. Mais les machines à haute pression sont beaucoup plus altérables que les autres; il faut beaucoup plus de perfection dans le jeu des pièces, et les réparations sont beaucoup plus fréquentes. Si l'on considère d'ailleurs que les chaudières sont éprouvées à proportion de la pression intérieure qu'elles devront supporter, et si l'on envisage de plus la nature des causes d'explosion que nous avons signalées, on reconnaît que les machines à haute pression ne présentent pas plus de danger d'explosion que les autres. On pourrait même dire, en un sens, qu'elles en offrent moins, parce que, les mêmes causes d'explosion possible étant données, les chaudières des machines à basse pression offriront moins de résistance.

274. Les applications de la machine à vapeur à l'industrie sont nombreuses, et d'une importance telle que l'on doit dire que, grâce à ce nouvel agent, l'industrie et la vie sociale tout entière ont subi une révolution profonde. Outre l'élévation des eaux, l'exploitation des mines, les filatu-

res, les scieries mécaniques, les pilotis, la fabrication des monnaies, et une infinité d'autres industries, la vapeur s'applique spécialement à la navigation et au transport par les rails-ways.

Dans les bateaux à vapeur, une et quelquefois deux machines à cylindre oscillant, ou tout au moins couchées pour ménager la hauteur du bâtiment, font mouvoir par des manivelles un arbre horizontal qui sert d'axe et de moyeu à deux roues à palettes ; ces palettes font l'effet de rames, et poussent le bâtiment dans une direction ou une autre, selon le sens du mouvement qui leur est imprimé. On fait des frégates à vapeur de la force de plusieurs centaines de chevaux. Bateaux à vapeur.

La vitesse de transport, pour un même navire, dépend de la puissance de la machine, de la tension de la vapeur et du sens de la marche, selon qu'on suit ou qu'on remonte un courant. Mais elle dépend aussi de la forme, de la charge et de l'installation des vaisseaux. Les bateaux à vapeur, dans le système actuel, sont condamnés par la disposition forcée de leurs machines, à des formes très-désavantageuses qui en rendent la manœuvre difficile, sans compter d'autres inconvénients. Or ceux-ci sont d'ailleurs très-graves, et justifient amplement les tentatives qui ont été faites pour changer radicalement le système du navire à vapeur. Entrons à ce sujet dans quelques détails.

Les roues à palettes frappent l'eau d'une manière désavantageuse à la puissance; car lorsqu'une des palettes entre dans l'eau en s'appuyant

contre le liquide, il y a une autre palette qui sort de l'eau en soulevant celle-ci; il y a donc une résistance notable qui anéantit une partie de la force motrice. De plus, le choc des palettes se fait toujours plus ou moins obliquement par rapport à la direction de transport du navire; il y a donc là une seconde perte. Enfin les palettes frappent l'eau déjà animée d'une vitesse rétrograde par chacun des chocs qui précèdent; le point d'appui offre donc d'autant moins de résistance; ce qui paralyse encore l'action de la force. Il en résulte donc pour celle-ci un triple déchet qui nécessite l'emploi d'une puissance deux ou trois fois plus grande que celle qu'exigerait le mouvement du navire dans le système qui n'offrirait pas ces désavantages. Or l'augmentation de la force motrice est une augmentation de dépense.

En second lieu, dans le système actuel, les navires à vapeur doivent porter une énorme quantité de houille destinée à leur consommation, ce qui a pour conséquence de diminuer la capacité réservée aux passagers et aux marchandises, ou, ce qui revient au même, rend l'emploi de ces navires comparativement très-dispendieux. Si on les destine à de longs trajets, la houille de consommation occupe alors tant de place qu'il faut donner au navire des dimensions exagérées, et sortir des bonnes proportions que doit avoir un navire pour être parfaitement stable, solide et facile à gouverner; encore est-il arrivé souvent que, malgré les chargements énormes, le combustible a fait défaut et

laissé le navire à vapeur comme désemparé en pleine mer. Aussi les compagnies anglaises des paquebots transatlantiques se sont-elles ruinées dans cette entreprise.

Enfin, si l'on considère les navires actuels au point de vue militaire, on reconnaît qu'il était impossible d'imaginer rien de plus imparfait. La disposition des machines interdit une bonne partie de la longueur du navire, et oblige de placer l'artillerie vers les extrémités, ce qui en restreint considérablement le service, à tel point que les plus grands vaisseaux à vapeur ne sauraient porter au delà de 20 pièces. Un second désavantage plus grave encore que celui-là, est que l'appareil moteur des roues latérales peut être facilement endommagé et brisé dès le premier coup de canon, de sorte que le navire est mis immédiatement hors de service. Enfin la nécessité de porter son charbon, l'oblige à se contenter de munitions et d'un équipage peu considérables.

Si de plus l'on considère que la vitesse d'un vaisseau à vapeur ne dépasse pas en général et souvent n'égale pas celle d'un navire à voiles sous l'action d'un bon vent, si l'on remarque encore que la vapeur se paye cher, tandis que le vent est une force tout à fait gratuite, on en conclura qu'une réforme fondamentale consistera d'abord, sous le point de vue économique, à ne faire de la vapeur que l'auxiliaire du vent qui restera le moteur principal et ordinaire. Nous aurons donc des navires à voiles construits à peu près dans le

système en usage; ces navires porteront des machines qui ne fonctionneront que lorsque le vent deviendra contraire ou tout à fait nul. De cette manière, on réduira considérablement la dépense du combustible, la place qu'il accapare dans le vaisseau, et le danger d'en manquer d'une manière inopportune; de plus, les frais d'entretien seront moins onéreux; nous jouirons donc d'avantages économiques de la plus haute importance, sans compter que la stabilité et la manœuvre du navire y gagneront beaucoup.

Pour satisfaire aux exigences du service de guerre, il faudra rendre libres les flancs des navires, et disposer les machines de telle sorte qu'elles ne soient pas exposées en plein au feu de l'artillerie. Nous aurons donc encore des vaisseaux à voiles, susceptibles de présenter plus de bouches à feu, et de recevoir plus de munitions et d'équipages, et ne se servant de leurs machines qu'exceptionnellement, pour ainsi dire. Pour ce qui est du moyen de les dérober aux coups, deux systèmes sont proposés; celui des *hélices*, et celui de l'appareil *palmipède*.

Hélices. L'hélice est un large ruban métallique composé de quatre ailes, qu'on pourrait comparer à celles d'un moulin à vent; elles sont seulement à proportion beaucoup plus larges, plus rapprochées, et plus tordues, de manière à figurer le filet d'une vis. Cette sorte de roue est placée à l'arrière du navire, et fonctionne sous l'eau même, où elle est mue par une machine également placée à l'arrière.

Elle frappe l'eau par ses ailes, et produit en vertu de ce choc oblique un mouvement de progression; mais il paraît certain qu'à force motrice égale elle produit moins d'effet que le système des roues à palettes. Cela résulte de la petitesse obligée et de l'obliquité forcée des ailes de l'hélice, ce qui entraîne la nécessité d'une très-grande vitesse, et par suite une grande dépense de combustible. L'hélice est encore sujette à d'autres inconvénients; toutefois, au point de vue militaire, elle résout à peu près le problème important que nous nous sommes proposé.

Mais le but est bien plus complétement atteint par le système de l'appareil palmipède imaginé par M. de Jouffroy, fils de l'homme de génie à qui l'on doit la navigation par la vapeur, et auteur lui-même d'un système de chemin de fer qui réunit au plus haut degré toutes les conditions de sécurité et d'économie. En considérant de quelle manière les oiseaux nageurs se transportent sur l'eau, M. de Jouffroy a imaginé de placer à l'arrière du navire un appareil analogue aux pieds de cygne; de larges surfaces métalliques sont poussées contre l'eau, comme les membranes de ces pieds; elles le sont dans la même direction que le mouvement voulu pour le navire; et ainsi que l'oiseau nageur, après avoir donné son coup de rame, retire son organe de telle sorte qu'il coupe l'eau par son profil et n'éprouve que peu de résistance, de même les palmes métalliques se retournent après la poussée, en coupant l'eau par leur tranchant. Quand

Appareil palmipède.

l'effet d'une impulsion est usé, elles donnent un autre coup de rame, et ainsi de suite. Ces effets contraires sont produits par un ingénieux système de leviers que met en mouvement une machine à vapeur placée aussi à l'arrière du vaisseau. Un rapport extrêmement favorable de la Commission de l'Académie des sciences constate que dans diverses épreuves comparatives faites sur deux modèles, l'un dans le système palmipède, l'autre pourvu de roues, toutes les circonstances étant d'ailleurs identiques, le système palmipède a manifesté une très-grande supériorité de marche. Une épreuve faite en mer avec une goëlette de 120 tonneaux fut entravée par un accident qui témoigne en faveur de la supériorité de ce mécanisme. Les ailes de l'appareil, faites en tôle trop mince, se déchirèrent sous la puissance des chocs, et ce fut, pour ainsi dire, avec les pattes cassées, que la goëlette fit sa route, avec une vitesse de deux à trois lieues.

L'appareil palmipède se trouve, comme l'hélice, presque entièrement à l'abri des coups de l'artillerie dans les combats; et permet d'employer le système ordinaire des vaisseaux à voiles. Mais il a sur l'hélice l'avantage de pouvoir être, en cas d'accident, facilement réparé; et celui de donner économiquement une puissance bien plus considérable. Il est proposé par son auteur pour suppléer à la voile dans des voyages de long cours, en l'absence du vent; et déjà maître de la solution du problème de la navigation de guerre, il paraît

appelé à résoudre seul et complétement celui d'une navigation commerciale économique.

275. Les locomotives des trains qui coulent sur les chemins de fer sont des machines ordinaires à haute pression qui mettent en mouvement rotatif une manivelle. Celle-ci fait tourner un essieu auquel sont assujetties des roues qui tournent avec lui tout d'une pièce; le frottement de ces roues sur les rails offre une résistance suffisante pour former point d'appui et déterminer la progression. Mais cette résistance entraîne, comme condition nécessaire, la lourdeur des locomotives, ce qui est un très-grave inconvénient; ce poids est réduit au quart environ dans l'admirable système de M. de Jouffroy, que nous avons déjà mentionné (n° 64) et dont nous dirons encore quelques mots. Dans ce système, le rail central strié donne un frottement qui permet et d'alléger les locomotives, et de gravir des pentes de 50 millimètres, au lieu de 8 seulement qu'on se permet à grande peine dans le système actuel. Les waggons se composent de deux caisses articulées qui n'ont chacune qu'un seul essieu et deux roues, ce qui permet aux waggons de se plier sans effort à toutes les sinuosités de la route; à tel point qu'on tournera dans des cercles de 10 mètres de rayon, tandis qu'on se permet à peine aujourd'hui des courbes de mille mètres. Ces deux facilités introduisent dans les frais d'établissement une économie qui paraît aller à 60 p. 100. Sous le rapport de la sécurité, les avantages sont plus grands encore. L'articulation

Locomotive des rails-roads.

des waggons prévient le déraillement, la disposition des rails en ornières et l'abaissement des caisses empêchent les roues de sortir de la voie; enfin dans le cas d'un arrêt subit dû à la rupture de quelque pièce ou à un choc quelconque, les waggons, au lieu de se précipiter et de s'écraser les uns sur les autres, comme il est arrivé tant de fois, s'arrêtent instantanément, par l'effet de la compression de ressorts qui séparent toutes les caisses, et dont le jeu d'ailleurs appuie de puissants freins contre les roues. Ces avantages, avec beaucoup d'autres, ont été constatés à l'échelle d'un cinquième par des expériences publiques multipliées qui ont réussi à conquérir tous les suffrages; et nous ne doutons pas que le système Jouffroy appliqué sur une grande échelle, ne justifie bientôt l'opinion qu'on a conçue de son immense supériorité sur le grossier et dangereux système qui a régné exclusivement jusqu'à ce jour.

CHAPITRE XX.

DES DIFFÉRENTES SOURCES DE LA CHALEUR.

276. La chaleur est naturellement produite par le soleil, et par les fonctions de la vie organique : celles-là sont incessantes et en dehors du domaine de notre volonté; mais il y en a une foule d'autres que nous pouvons faire agir à notre convenance.

La plus énergique et la plus commode est la combustion. Il faut, en général, une température rouge pour la déterminer; une fois commencée, elle continue d'elle-même, tant qu'on fournit à l'oxygène de l'air du combustible, c'est-à-dire une substance avec laquelle il puisse se combiner chimiquement. Mais cette élévation de température n'est pas nécessaire dans tous les cas. De la poudre de cuivre, d'arsenic, d'antimoine surtout, projetée dans du chlore gazeux, y brûle instantanément avec flamme. Un bâton de phosphore en fait autant à froid. Divers pyrophores s'enflamment au contact de l'air; certaines autres substances par leur contact réciproque : telle est l'essence de térébenthine au contact de l'acide nitrique, le potassium au contact de l'eau la plus froide. Mais tous ces faits sont plus particulièrement du domaine de la chimie. Combustion.

277. Il est important de connaître quelles sont les quantités relatives de chaleur qui sont données par la combustion de différentes substances. Voici d'abord un tableau pour quelques-unes des principales. On l'a formé en faisant brûler un même poids de ces diverses matières, et recueillant la chaleur dégagée dans un réfrigérant à serpent où elle échauffait un poids donné d'eau :

Un kilogramme de	donne :
Hydrogène	23640 unités de chaleur.
Huile d'olive	9044
Suif	8369
Éther sulfurique	8030
Carbone pur	7914
Phosphore	7500
Charbon de bois	7300
Hydrogène bicarboné	6600
Coke	6500
Charbon de tourbe	6400
Alcool à 42°	6195
Houille grasse moyenne	6000
Alcool à 33°	5261
Essence de térébenthine	4500
Bois parfaitement sec	3500
Tourbe, bonne qualité	3000
Bois séché à l'air	2600
Oxyde de carbone	1800

On voit que les différences entre les extrêmes sont énormes. Il faut ajouter que tous ces nombres sont loin d'être irrécusables. On ne peut admettre avec une parfaite certitude que ceux de l'hydrogène et du carbone.

Il serait facile, d'après le tableau précédent, de calculer quelle quantité de combustible d'une certaine nature serait nécessaire pour chauffer, à 100° par exemple, un poids d'eau donné. Qu'il s'agisse, par exemple, de 95 litres d'eau prise à 20°. Il s'agit de donner 80° de chaleur à 95 kilogrammes d'eau, ou autrement de produire $95 \times 80 = 7600$ unités. Or, si l'on veut chauffer au bois ordinaire, il en faudra autant de kilogrammes que 7600 contient 2600, ou 3 kilogrammes tout juste. Mais dans la pratique il y a tant de chaleur perdue, que ces sortes de calculs sont illusoires : à peine un dixième de la chaleur produite est utilisé. Valeurs relatives des divers combustibles.

278. Mais il est fort important de connaître les quantités relatives de chaleur que produisent dans les mêmes circonstances les divers combustibles communément employés, tels que les variétés de bois et de charbon. On a d'abord reconnu, et ce résultat est fort important, qu'à poids égal, les diverses natures de bois donnent à peu près la même quantité de chaleur. Il en est tout autrement si l'on compare les bois par volumes égaux, comme on en jugera par le tableau suivant :

	Un stère de bois d'une année de coupe donne :	Un hectolitre de son charbon donne :
Noyer..........	1,935,500 unités..	292,000 unités.
Chêne.........	1,711,500.......	255,000
Frêne.........	1,493,500.......	219,000
Hêtre..........	1,400,750.......	176,000
Charme........	1,394,000.......	176,000
Orme..........	1,122,000.......	167,000

Un stère de bois d'une année de coupe donne :		Un hectolitre de son charbon donne :
Bouleau........	1,025,500 unités..	153,000 unités.
Pin...........	1,065,750........	160,000
Châtaignier.....	1,009,000.......	146,000
Peuplier d'Italie.	767,250.......	109,000
Un hectolitre de houille, moyenne qualité........................		480,000
Un hectolitre de coke, moyenne qualité..........................		182,000

Ce tableau ne suffit pas pour décider immédiatement des avantages économiques de tel ou tel combustible; les valeurs relatives sont déterminées par les prix de revient au lieu où l'on se trouve. Ainsi à Paris, le prix de l'hectolitre de houille varie entre 4 et 5 fr.; ainsi pour 5 fr. au plus, on a environ 500,000 unités de chaleur. Un stère de bois de chêne coûte environ 20 fr. tout placé, et fournit 1,721,500 unités; ce qui revient à 430,400 unités pour 5 fr. Le chauffage à la houille est donc plus économique.

Mesure du bois au volume et au poids.

279. Le tableau précédent montre que les diverses sortes de bois considérés comme combustibles, doivent avoir des prix très-différents, et l'on peut conclure qu'il y a avantage à prendre pour la consommation des foyers le bois scié d'avance qu'on livre maintenant au poids dans les chantiers de Paris. Car alors il n'est pas nécessaire d'examiner et de discuter la nature et la qualité des bois, tous donnant sensiblement la même quantité de chaleur à poids égal; tandis que le bois livré au volume représentera des valeurs

variables comme la nature des bois. On objecte, il est vrai, que le bois livré à la balance donne le déchet de l'humidité, et que le vendeur peut exploiter cette circonstance au préjudice du consommateur. Mais il est facile de s'assurer que ce bois qui est conservé à couvert dans les chantiers n'a en général d'autre humidité que celle qu'il tient nécessairement de l'atmosphère; une mouillure artificielle serait trop aisée à reconnaître. On a donc affaire à une substance qui se trouve dans des conditions habituellement identiques, et dès lors la fraude n'est pas possible; il ne s'agit plus que de savoir quel est en bois scié le poids qui donnerait une chaleur équivalente à un stère de bois de chêne, et d'en régler le prix sur le prix de ce dernier. Or, à Paris, un stère de bois de chêne coûte moyennement 19 à 20 fr. et développe 1,721,000 unités de chaleur. Or, le bois séché à l'air donne 2600 unités par kilogramme. L'équivalent en poids d'un stère de chêne sera donc le quotient de 1,721,000 divisés par 2600, ou 662 kilogrammes d'un bois quelconque. Donc 662 kilogr. de bois devront se payer moyennement 20 fr. indépendamment des frais de sciage. La voie ou double stère de chêne aura pour équivalent 1324 kilogr., qui se payeraient 40 fr. En fait, on ne livre guère dans les chantiers que 800 kilogr. pour ce prix-là. Il convient de faire observer, il est vrai, que nous supposons que le bois livré au stère pour le prix de 20 fr. est purement de chêne, tandis qu'il est en général mêlé; 2° que

nous avons pris le chiffre 2600 pour la chaleur donnée par le bois ordinaire, et que ce chiffre n'est rien moins que certain ; nous sommes porté à croire qu'il doit être plus considérable. Le meilleur moyen de fixer le rapport dont il s'agit, consisterait à peser un stère de chêne d'un prix convenu, et de livrer pour ce prix le poids trouvé, mais en l'appliquant désormais aux bois d'essence quelconque. C'est ainsi sans doute qu'a été déterminé le chiffre de 800 kilogr., et nous le croyons à très-peu près exact. Nous devons faire observer encore en faveur de la fourniture au poids, que la mesure au volume est essentiellement variable, selon la grosseur des bûches : le service en bois mince est désavantageux, à cause des nombreux vides qu'il recèle ; et la différence d'un stère à l'autre peut être une fraction notable du volume total. Il n'y a donc dans la fourniture au volume, qu'incertitude, arbitraire, inégalité, et voie ouverte à la fraude.

...te de chaleur dans ... foyers. 280. Les tables précédentes font reconnaître la perte énorme de chaleur qui se fait dans les foyers. On cite l'exemple suivant, qui peut en donner une idée assez exacte. Si l'on jette un kilogr. de fonte en fusion dans 20 kilogr. d'eau à zéro, la température de la masse s'élève à 14°, ce qui fournit 280 unités de chaleur. Or, on brûle moyennement un demi-kilogr. de houille pour opérer la fusion d'un kilogr. de fer ; d'ailleurs, le premier tableau nous donne 3000 unités pour un demi-kilogr. de houille ; on voit donc qu'il n'y a

d'utilisé que $\frac{280}{3000}$, ou 0,093, ou enfin moins du dixième de chaleur totale fournie par la combustion de la houille. Il faut tenir compte, il est vrai, du calorique absorbé par la vapeur qui se forme; nous supposons que la correction a été faite ou qu'il a été pris quelque moyen d'empêcher sa formation. Cet exemple peut faire juger des pertes énormes auxquelles donnent lieu nos cheminées ordinaires, où la chaleur est beaucoup moins concentrée que dans les fourneaux d'usines. Ce déchet sur la chaleur produite est analogue aux frottements qui élident partout une portion notable de l'action des forces, et il met en relief ce principe important, que les réalités sont souvent fort loin des indications de la théorie.

Les sources artificielles de chaleur, outre la combustion, sont les suivantes.

281. Le frottement est une source de chaleur souvent très-énergique; on cite mille expériences qui le prouvent, et c'est pour ainsi dire un phénomène de chaque instant. Parmi ses applications utiles, nous citerons l'inflammation du phosphore, de la préparation phosphoro-chloratée des allumettes dites chimiques. On sait aussi qu'en frottant vivement l'un sur l'autre des morceaux de bois sec, les sauvages réussissent à les enflammer. Nous n'avons jamais vu l'expérience aller jusqu'à pareil succès, mais il est aisé de charbonner le bois de cette manière et de le faire fumer. Pour cela, on prend un bâton conique dont on façonne la pointe, et on l'insère dans un petit trou qu'on

Chaleur due au frottement.

creuse dans une boiserie, puis serrant le bâton entre la boiserie et la poitrine, on le fait tourner avec une corde : en peu de secondes, la pointe du bâton donne de la fumée.

282. La percussion dégage de la chaleur plus encore que le frottement, et par une action analogue. On sait que les forgerons, en frappant habilement un barreau de fer, parviennent à le faire rougir. L'inflammation des amorces fulminantes est due à cette cause. Mais l'application la plus importante de cette propriété est à coup sûr le briquet ordinaire, qui remonte certainement jusqu'aux races antédiluviennes. Le choc du silex contre l'acier détache de celui-ci des parcelles que la chaleur de la percussion fait fondre; les petits globules qui se forment tombent sur l'amadou, et le brûlent. Deux silex frappés l'un contre l'autre dégagent de la chaleur et de la lumière; mais comme il n'y a pas fusion, la chaleur disparaît immédiatement et l'amadou ne prend pas feu.

283. La compression dégage de la chaleur, comme on peut s'en assurer dans une foule de cas; mais cette propriété trouve surtout une application utile et intéressante dans le *briquet à air*.

Chaleur due à la compression.

Ce petit instrument se compose d'un corps de pompe fermé par le bas, long de 10 à 15 centimètres, et de quelques millimètres de diamètre seulement. Un piston sans soupape s'y enfonce par une poussée brusque, et foule au fond du cylindre l'air qui y est entré par une échancrure latérale, comme dans les pompes

de compression ordinaire. Mais cet air ne peut sortir, et réduit à un petit volume par la brusque impulsion du piston, il dégage une chaleur telle, qu'elle enflamme un petit morceau d'amadou placé au fond du cylindre. L'air comprimé repousse ensuite le piston. On retire celui-ci, et l'on applique une allumette soufrée à l'amadou.

284. Les combinaisons chimiques, et entre autres celle de l'eau avec les acides ou les bases, produisent souvent de la chaleur. On peut mettre cette propriété à profit pour chauffer de l'eau au besoin presque instantanément. En mêlant 500 grammes d'eau avec 1250 grammes d'acide sulfurique concentré, on obtient en quelques instants une température très-supérieure à celle de l'eau bouillante, puisqu'elle s'élève jusqu'à 130°. Nous avons dit qu'une partie de glace se fondait dans quatre d'acide sulfurique en produisant beaucoup de chaleur. On conçoit donc qu'on puisse chauffer rapidement de l'eau dans un vase large et plat, en plongeant ce vase dans le mélange d'acide et d'eau dont il vient d'être question.

L'eau, en tombant en petite quantité sur la chaux vive avec laquelle elle se combine, dégage assez de chaleur pour enflammer la poudre, et le soufre des allumettes communes; on met à profit cette propriété pour échauffer les lits. On enferme au pied, sous les couvertures, une boule d'étain pleine de chaux sur laquelle on verse d'abord la quantité d'eau convenable, puis on ferme la

Chaleur due aux combinaisons chimiques.

boule, et on la dépose dans le lit; la chaleur ainsi produite est abondante et assez durable.

285. Les mélanges pâteux d'eau et de diverses poudres donnent un dégagement de chaleur, surtout quand le mélange a lieu entre des substances ayant une action chimique réciproque. On pétrit ensemble de la limaille de fer, de la fleur de soufre et de l'eau, et l'on enterre le tout dans le sol, à une profondeur proportionnée à la quantité du mélange. Au bout de quelques heures, il se produit une éruption volcanique qu'on attribue surtout à l'expansion de la vapeur d'eau formée; celle-ci proviendrait de la chaleur développée par les actions chimiques réciproques. Cette expérience, dite du *volcan de Lemery*, est très-agréable.

Chaleur due à l'électricité.

286. L'électricité offre un moyen très-énergique de produire de la chaleur. Des fils métalliques sont fondus par la décharge des batteries, et de fortes piles opèrent la fusion du platine.

Chaleur due à la lumière.

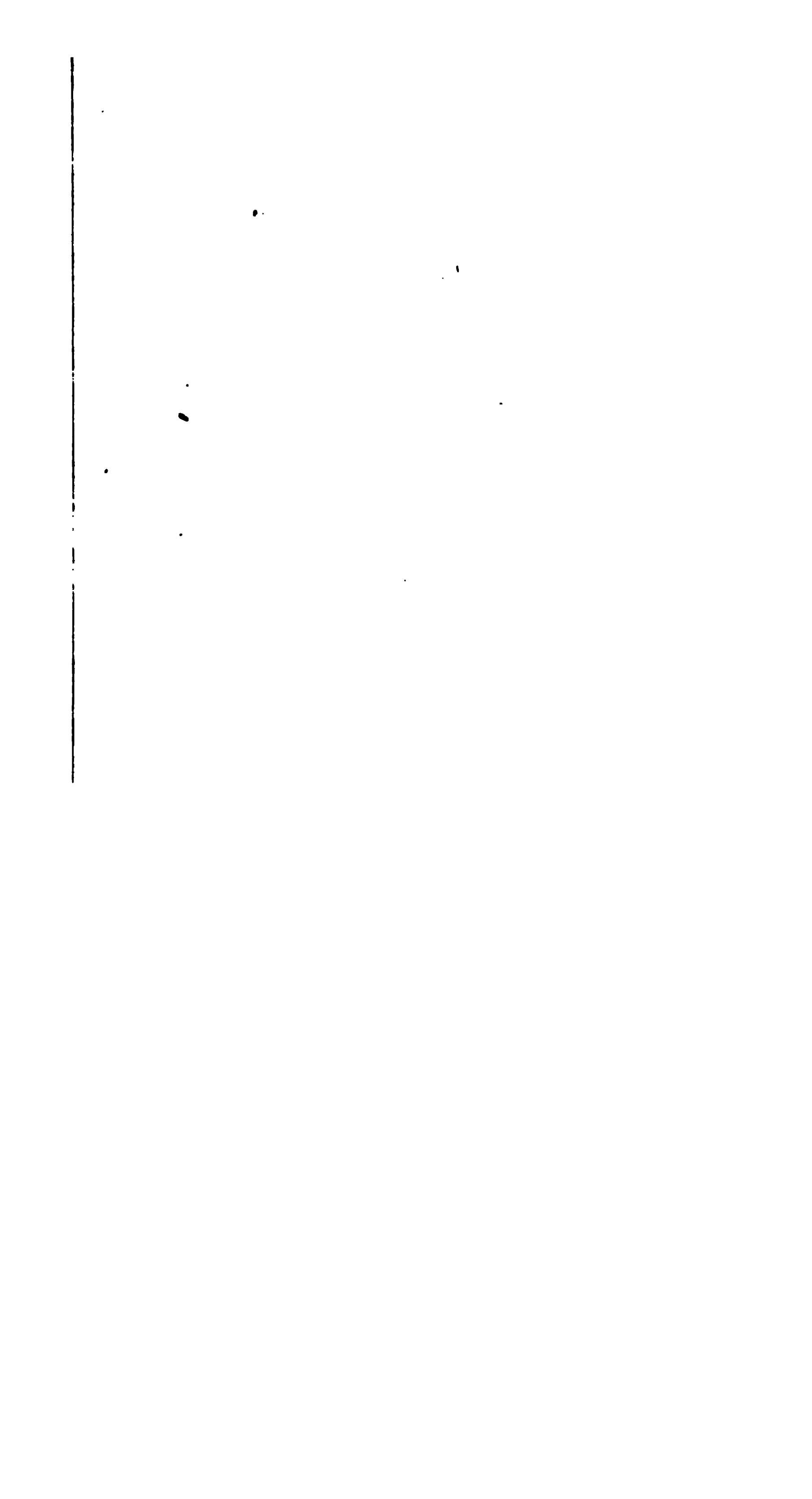
287. La lumière solaire concentrée avec des miroirs concaves ou des lentilles, produit des effets de chaleur d'une grande intensité. Avec de grands miroirs et de fortes lentilles, on fond tous les métaux moins le platine à plusieurs mètres de distance.

On peut produire des combustions de poudre ou autres au moyen d'une lentille de glace, qui, lorsqu'elle est formée à une très-basse température, brûle les autres corps sans se fondre ou s'échauffer elle-même sensiblement.

288. Enfin, l'intérieur de notre globe offre, comme on sait, une température croissante, à partir de la couche invariable située à quelques mètres au-dessous du sol. Plus l'on s'enfonce sous terre, plus est chaude l'eau des sources qu'on y rencontre : celle du puits de Grenelle sort à une température de 29°. Or, on peut mettre à profit cette chaleur qui paraît constante dans chaque lieu : en creusant à une profondeur suffisante, on aura de l'eau assez chaude pour qu'on puisse l'appliquer immédiatement au service des bains; celle du puits de Grenelle n'aurait besoin que de 5° à 6° de plus pour être propre au même usage; on pourrait donc l'amener facilement au degré convenable.

Chaleur interne du globe.

FIN DU PREMIER VOLUME.



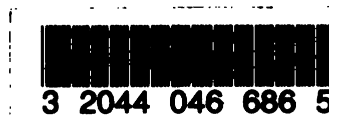
TABLE

DES

MATIÈRES CONTENUES DANS CE VOLUME.

FIN DE LA TABLE.




3 2044 046 686 5

